

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD HÍDRICA DE LA CUENCA  
HIDROGRÁFICA DEL RÍO AIPE MEDIANTE LA ESTIMACIÓN DE INDICADORES  
HÍDRICOS Y MODELACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA**

**ERIKA ROCIO OVALLE CAMACHO**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS  
BOGOTÁ D.C – 2019**

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD HÍDRICA DE LA CUENCA  
HIDROGRÁFICA DEL RÍO AIPE MEDIANTE LA ESTIMACIÓN DE INDICADORES  
HÍDRICOS Y MODELACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA**

**ERIKA ROCIO OVALLE CAMACHO**

**Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos.**

**ASESOR: JESÚS ERNESTO TORRES QUINTERO**  
**INGENIERO CIVIL, MSC.**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS**  
**BOGOTÁ D.C – 2019**



La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución 2.5 Colombia (CC BY 2.5)**  
Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/co/>

#### Usted es libre de:

- Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas
- hacer un uso comercial de esta obra



#### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá D.C., Junio de 2019.

## Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a Dios quien me proporciona los recursos y el don del entendimiento; a mi esposo por su apoyo y amor incondicional; a mi hijo por ser el motor que me impulsa cada día y a mis padres y hermanos porque con ellos he conocido el verdadero valor de la vida.

## Agradecimientos

Expreso mis agradecimientos a.

La Universidad Católica de Colombia y sus docentes por la oportunidad brindada para profundizar los conocimientos y desarrollar fuertes competencias en la gestión de los recursos hídricos.

Mis compañeros de especialización porque aportaron al crecimiento y desarrollo profesional.

Al asesor del proyecto de grado, el Ingeniero Jesús Ernesto Torres Quintero por su apoyo y colaboración en la consolidación del proyecto.

Al ingeniero Juan Pablo Macías por sus aportes técnicos en el desarrollo de la modelación hidrológica.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>15</b>
<b>1. GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1. LINEA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.1. Antecedentes del problema .....</b>	<b>16</b>
1.2.2. Pregunta de investigación .....	17
<b>1.3. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4. OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
1.4.1. Objetivo general.....	19
1.4.2. Objetivos específicos .....	19
<b>2. MARCOS DE REFERENCIA .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1. MARCO CONCEPTUAL .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3. MARCO GEOGRÁFICO .....</b>	<b>32</b>
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2. ANALISIS DE INFORMACIÓN .....</b>	<b>35</b>
<b>3.3. MODELACIÓN HIDROLÓGICA .....</b>	<b>36</b>
<b>3.4. ESTIMACIÓN DE INDICADORES HÍDRICOS .....</b>	<b>37</b>
<b>3.5. PROPUESTA DE ESTRATEGIA DE PLANIFICACIÓN .....</b>	<b>37</b>
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA SUBCUENCA.....</b>	<b>38</b>
4.1.1. Localización.....	38
4.1.2. Caracterización fisiográfica y morfométrica .....	38

<b>4.2. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA .....</b>	<b>42</b>
4.2.1. Precipitación .....	45
4.2.2. Temperatura .....	51
<b>4.3. MODELACIÓN HIDROLÓGICA .....</b>	<b>55</b>
4.3.1. Simulación hidrológica .....	55
4.3.2. Calibración del modelo .....	71
<b>4.4. OFERTA HÍDRICA .....</b>	<b>73</b>
4.4.1. Oferta hídrica superficial total .....	73
4.4.2. Oferta hídrica superficial disponible .....	75
<b>4.5. DEMANDA HÍDRICA .....</b>	<b>78</b>
<b>4.6. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD .....</b>	<b>80</b>
4.6.1. Índice del uso del agua .....	80
4.6.2. Índice de retención y regulación hídrica (IRH) .....	84
4.6.3. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico .....	86
<b>4.7. MEDIDAS DE ADAPTACIÓN O MITIGACIÓN .....</b>	<b>90</b>
4.7.1. Medias de adaptación .....	90
4.7.2. Medidas de mitigación .....	91
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>99</b>



## LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1. Clasificación de los rangos de valores del IRH .....	22
Tabla 2-2. Clasificación de los rangos de valores del IRH .....	23
Tabla 2-3. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico (IVH).....	24
Tabla 2-4. Clasificación del relieve de acuerdo con pendiente .....	28
Tabla 2-5. Índice de Gravelius para la evaluación de la forma .....	29
Tabla 2-6. Valores interpretativos del factor de forma.....	30
Tabla 2-7. Valores interpretativos del índice de alargamiento .....	32
Tabla 2-8. Codificación de la subcuenca hidrográfica del río Aipe .....	33
Tabla 2-9. Microcuencas que conforman la subcuenca hidrográfica del río Aipe .....	34
Tabla 4-1. Área, perímetro, longitud axial, ancho y pendiente de las unidades de estudio de la subcuenca hidrográfica del río Aipe .....	38
Tabla 4-2. Pendiente media de las unidades de estudio de la subcuenca hidrográfica del río Aipe .....	39
Tabla 4-3. Índice de Gravelius de las unidades de estudio de la subcuenca hidrográfica del río Aipe.....	40
Tabla 4-4. Factor de forma de las unidades de estudio de la subcuenca hidrográfica del río Aipe .....	41
Tabla 4-5. Índice de alargamiento de las unidades de estudio de la subcuenca hidrográfica del río Aipe .....	42
Tabla 4-6. Estaciones meteorológicas seleccionadas .....	44
Tabla 4-7. Cobertura identificada en el área de estudio .....	61
Tabla 4-8. Unidades cartográficas de suelos identificadas en la subcuenca hidrográfica del río Aipe.....	61
Tabla 4-9. Relación de las temperaturas máxima y mínima y la elevación .....	65

Tabla 4-10. Oferta hídrica superficial total año hidrológico normal (m <sup>3</sup> /s) .....	74
Tabla 4-11. Oferta hídrica superficial total año hidrológico seco (m <sup>3</sup> /s).....	74
Tabla 4-12. Caudales ambientales 7Q10 y Q95 (m <sup>3</sup> /s).....	75
Tabla 4-13. Propuesta de caudal ambientales (m <sup>3</sup> /s) .....	76
Tabla 4-14. Propuesta de caudales ambientales en términos de fracción.....	76
Tabla 4-15. Oferta hídrica superficial total, caudal ambiental y oferta hídrica superficial disponible para año hidrológico normal y seco (m <sup>3</sup> /s) .....	77
Tabla 4-16. Demanda hídrica subcuenca hidrográfica del río Aipe .....	78
Tabla 4-17. Sectores socioeconómicos usuarios del recurso hídrico del río Aipe .....	79
Tabla 4-18. Índice del uso del agua para una condición hidrológica normal .....	80
Tabla 4-19. Índice del uso del agua para una condición hidrológica seca .....	81
Tabla 4-20. Índice de retención y regulación hídrica IRH .....	84
Tabla 4-21. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico para una condición hidrológica normal .....	86
Tabla 4-22. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico para una condición hidrológica seca.....	86

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Indicadores del régimen hídrico .....	22
Figura 2-2. Metodología para una simulación con SWAT .....	26
Figura 2-3. Relación entre la forma de la cuenca hidrográfica y caudales pico .....	31
Figura 2-4. Localización general de la subcuenca hidrográfica del río Aipe .....	32
Figura 4-1. Localización espacial de estaciones meteorológicas.....	43
Figura 4-2. Distribución espacial de la precipitación media anual multianual en la subcuenca hidrográfica del río Aipe.....	50
Figura 4-3. Distribución espacial de la temperatura media anual multianual (isotermas) en la subcuenca del río Aipe .....	54
Figura 4-4. Modelo de elevación Digital del Área de estudio .....	56
Figura 4-5. Hidrografía del área de estudio .....	57
Figura 4-6. Desarrollo del paso 1 .....	59
Figura 4-7. Delimitación de microcuencas río Aipe .....	60
Figura 4-8. Distribución espacial de la cobertura en la subcuenca hidrográfica del río Aipe .....	62
Figura 4-9. Unidades cartográficas de suelo identificadas en la subcuenca hidrográfica del río Aipe .....	63
Figura 4-10. Paso 2, Creación de unidades hidrológicas de respuesta .....	64
Figura 4-11. Visualización de las unidades hidrológicas de respuesta .....	64
Figura 4-12. Interfaz Swat Weather Database .....	66
Figura 4-13. Localización de estaciones meteorológicas y virtuales .....	66
Figura 4-14. Archivo CSV de datos climáticos .....	67
Figura 4-15. Conexión de bases de datos.....	67
Figura 4-16. Conexión de datos climáticos QSWAT_1 .....	68

Figura 4-17. Conexión de datos climáticos QSWAT_2 .....	68
Figura 4-18. Conexión de datos climáticos QSWAT_3 .....	69
Figura 4-19. Proceso de escribir las tablas en QSWAT.....	69
Figura 4-20. Inicio de corrida del modelo hidrológico .....	70
Figura 4-21. Corrida del modelo hidrológico .....	70
Figura 4-22. Índice del uso del agua para una condición hidrológica normal .....	82
Figura 4-23. Índice del uso del agua para una condición hidrológica seca .....	83
Figura 4-24. Índice del regulación y retención hídrica .....	85
Figura 4-25. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico para una condición hidrológica normal.....	88
Figura 4-26. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico para una condición hidrológica seca .....	89

## **RESUMEN**

En la subcuenca hidrográfica del río Aipe y debido a los reclamos indicados por algunos de los usuarios por la escasez del recurso hídrico, surge la necesidad de implementar acciones en pro del ecosistema acuático y de la economía regional beneficiaria del agua. Para ello, se planteó inicialmente la necesidad de evaluar la vulnerabilidad del sistema hídrico y con ello identificar las posibles causales de escasez sobre el río. Inicialmente se ajustó un modelo de simulación hidrológica con SWAT que permitiera una aproximación de la hidrología de las microcuencas y con esta información y los usos concesionados se determinaron índices de características naturales (IRH) y derivados de la intervención antropogénica (IUA e IVH)

De acuerdo con lo anterior se evidenció que para condiciones hidrológicas promedias la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico del río Aipe es moderada como resultado de la moderada capacidad de su cuenca para retener y regular el agua pero que para condiciones hidrológicas secas la vulnerabilidad es alta por la presión ejercida sobre la oferta hídrica por la demanda.

Teniendo en cuenta lo anterior se plantearon medidas de adaptación y mitigación que deben ser lideradas por la autoridad ambiental competente y en las que deben integrar a todos los actores involucrados con la subcuenca hidrográfica del río Aipe y con su recurso hídrico.

Palabras clave: índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, SWAT, indicadores de estado.

## **ABSTRACT**

In the sub-basin of the river Aipe and due to the claims indicated by some of the users due to the shortage of water resources, there is a need to implement actions in favor of the aquatic ecosystem and the regional economy that benefits from water. In order to do so, the need to assess the vulnerability of the water system was initially raised and, in doing so, to identify the possible causes of scarcity on the river. Initially, a hydrological simulation model was adjusted with SWAT that allowed an approximation of the hydrology of the micro-watersheds and with this information and the concessioned uses were determined natural characteristics indexes (IRH) and derived from the anthropogenic intervention (IUA and IVH)

According to the above it was evident that for average hydrological conditions the vulnerability to water shortage of the Aipe river is moderate as a result of the moderate capacity of its basin to retain and regulate water but for dry hydrological conditions the vulnerability is high due to the pressure exerted on the water supply by demand.

Taking into account the above, adaptation and mitigation measures were proposed that must be led by the competent environmental authority and in which they must integrate all the stakeholders involved with the Aipe river hydrographic basin and with its water resource.

Keywords: vulnerability index to water shortage, SWAT, state indicators.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia al igual que en otros países de Suramérica el agua representa un recurso vital que requiere ser cuantificado y administrado de manera sostenible. Bajo este principio y dada la importancia que representa el recurso hídrico superficial es necesario tomar acciones que permitan preservar tan valioso recurso, evitando así su mal uso y permitiendo su existencia para generaciones futuras.

Ahora, con el fin de facilitar la toma de decisiones relacionadas con la administración y planificación del recurso hídrico es necesario conocer con un mayor grado de precisión las condiciones hidrológicas de una cuenca hidrográfica derivadas de la interacción entre el clima, el tipo de suelo, su uso y pendiente. Sin embargo, dicho conocimiento aún no es suficiente para tomar decisiones si no que más bien representa un insumo que junto con los usos que se le dan al recurso permiten realizar un análisis de la vulnerabilidad y así conformar un diagnóstico que aporta información básica y estratégica para formular y posteriormente adoptar medidas de administración y protección del agua.

De acuerdo con lo expuesto, el presente estudio tiene por objeto evaluar a partir de indicadores, la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico en la cuenca hidrográfica del río Aipe, estimando su oferta hídrica superficial mediante la modelación con SWAT (Soil & Water Assessment Tool).

Como resultado de este estudio se espera el aporte de ideas y conceptos para que se realice una administración adecuada del recurso hídrico de la cuenca hidrográfica del río Aipe por parte de la entidad encargada, proporcionándole los insumos para emitir un diagnóstico sobre la disponibilidad hídrica actual e identificando la naturaleza de las problemáticas que inciden en la disponibilidad del recurso hídrico y de cómo en un futuro se pueden solucionar o mitigar.

## **1. GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO**

### **1.1. LINEA DE INVESTIGACIÓN**

Teniendo en cuenta que el desarrollo del presente trabajo tiene por objetivo la evaluación de la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico del río Aipe, así como también la postulación de posibles soluciones o acciones mitigantes, se considera que se ajusta dentro de la línea de investigación **Desarrollo Humano y sostenible**.

### **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.2.1. Antecedentes del problema**

El río Aipe es una fuente hídrica de gran importancia en la región norte del departamento del Huila; sus aguas riegan aproximadamente 990 ha de cultivos en los que predominan con un 95% del área irrigada el cultivo Arroz y, también abastece 105,18 ha de espejo de aguas destinadas a la piscicultura. Es la única fuente de abastecimiento para el consumo humano del sector urbano del municipio de Aipe con una población proyectada de 36616 habitantes (CAM, 2009).

En los últimos años, líderes, campesinos y dirigentes políticos del municipio de Aipe han planteado en diversas ocasiones su evidente preocupación por la progresiva disminución del caudal del río a causa de lo que ellos consideran una sobreexplotación autorizada mediante permisos de concesión de aguas otorgadas por la autoridad Ambiental.

De esta manera, ya se evidencia socialmente una situación de desabastecimiento hídrico; sin embargo, se desconoce su veracidad y técnicamente



su naturaleza (régimen natural o influencia antropogénica) y categoría. Por lo anterior, la autoridad ambiental no tiene a la fecha instrumentos que soporte la aplicación de acciones que propicien un desarrollo armónico entre la sostenibilidad hídrica y ecológica del cauce y, el desarrollo socioeconómico de la región.

### **1.2.2. Pregunta de investigación**

¿Cuál es la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico de la cuenca hidrográfica del río Aipe para un escenario de condiciones climáticas actuales y, cuáles pueden ser las posibles soluciones y/o acciones de mitigación?

## **1.3. JUSTIFICACIÓN**

La baja disponibilidad de agua en una determinada región limita el desarrollo de diferentes sectores socioeconómicos y debido a esto, propicia la pobreza y genera problemas de orden público relacionados con la disputa de este recurso natural. Por su parte, la abundancia posibilita en resumen el mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades y desde el punto de vista natural permite el sostenimiento de los ecosistemas.

Los factores que influyen en la categorización de la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico de una cuenca hidrográfica son de régimen natural y de carácter antrópico, variando la preponderancia de uno u otro de acuerdo con la zona de análisis. En algunas cuencas hidrográficas, su capacidad de regulación hídrica y el clima, son promotores del mantenimiento de una buena oferta hídrica; sin embargo, es a causa de la sobreexplotación del agua que se tiene escasez.

Teniendo en cuenta lo anterior surge la necesidad imperante de garantizar el sostenimiento de las fuentes hídricas en todo el territorio nacional. Es así, que el IDEAM

dentro de sus funciones ha determinado la situación actual del agua y para ello ha considerado las características del régimen natural y la estrecha relación existente entre el agua, el medio ambiente y los organismos vivos -incluyendo los seres humanos y, los resultados han sido consignados en documentos públicos como son los Estudios Nacionales del Agua (IDEAM, 2010 e IDEAM, 2014). Sin embargo, al revisar dichos instrumentos se evidencia que la información está planteada considerando como unidad mínima de análisis subzonas hidrográficas y, en caso de requerirse información más precisa como por ejemplo de cuencas y microcuencas de menor orden, esta no está disponible.

La cuenca hidrográfica del río Aipe hace parte de la Subzona hidrográfica Río Aipe, Río Chenche y otros directos al Magdalena y de acuerdo con los datos publicados por el IDEAM, 2010 e IDEAM 2014, se tiene que el índice de Vulnerabilidad por desabastecimiento Hídrico para las condiciones actuales (entendiéndose por actuales las del año de publicación) es Alto tanto para un año hidrológico de condiciones normales como secas; sin embargo, como ya se había mencionado en el párrafo anterior esta categorización analiza la oferta y demanda hídrica de la Subzona y no de la cuenca en particular.

Por otra parte, y teniendo en cuenta que sobre el cauce del río Aipe solamente se tiene una estación hidrométrica que registra sus caudales cerca de su desembocadura sobre la margen izquierda del río Magdalena y, que por ende no se tiene información de la oferta hídrica sobre sus afluentes y sobre el mismo antes de todo uso se requiere la aplicación de una herramienta hidrológica que permita cuantificar dichos caudales, y así, contar con una información que permita estimar la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico de áreas cada vez más detalladas.

Por lo expuesto, inicialmente en este proyecto se considera necesario aplicar un modelo hidrológico que permita simular la relación de los diferentes parámetros que gobiernan el ciclo hidrológico y la generación de escurrimiento y así contar con información detallada de la oferta hídrica superficial no solo sobre el río Aipe si no también sobre sus principales afluentes. Seguido y con la información de caudales generada y los usos

concesionados se evalúa la vulnerabilidad al desabastecimiento Hídrico del Río Aipe constituyéndose así un insumo para la planificación del recurso hídrico, priorización de acciones de adaptación y/o mitigación y toma de decisiones por parte de la autoridad ambiental competente.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Evaluar la vulnerabilidad hídrica de la cuenca hidrográfica del río Aipe mediante la estimación de indicadores hídricos.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Simular el comportamiento hidrológico de los principales afluentes del río Aipe y del mismo mediante la aplicación del modelo hidrológico SWAT.
- Estimar los indicadores hídricos de los principales afluentes del río Aipe y del mismo, asociados al régimen natural y a la intervención antrópica.
- Estimar la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico de los principales afluentes del río Aipe y del mismo y plantear posibles soluciones o acciones mitigantes a los problemas identificados.

## **2. MARCOS DE REFERENCIA**

### **2.1. MARCO CONCEPTUAL**

#### **Oferta hídrica**

La oferta hídrica total superficial ha sido definida por el IDEAM, 2010, como “*el volumen de agua continental que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial*”; sin embargo, no es esta la oferta considerada para la estimación de indicadores como el Índice de uso del Agua, sino que se tiene en cuenta aquella en la que ya ha sido descontado el caudal Ambiental y que se reconoce como oferta hídrica superficial disponible.

#### **Demanda hídrica**

El IDEAM, 2010 define la demanda de agua como “la extracción hídrica del sistema natural destinado para suplir las necesidades o requerimientos del consumo humano, la producción sectorial y las demandas esenciales de los ecosistemas no antrópicos” siendo esta última la destinada como caudal ecológico y ambiental.

Las demandas hídricas se agrupan teniendo en cuenta el orden de prioridad establecido en el artículo 41 del decreto 1541 de 1978 actualmente compilado en el decreto 1076 del 2015 en el artículo 2.2.3.2.7.6. Este orden se presenta a continuación:

- a) Utilización para el consumo humano, colectivo o comunitario, sea urbano o rural.
- b) Utilización para necesidades domesticas individuales.
- c) Usos agropecuarios comunitarios, comprendidas la acuicultura y la pesca.
- d) Usos agropecuarios individuales, comprendidas la acuicultura y la pesca.

- e) Generación de energía hidroeléctrica.
- f) Usos industriales o manufactureros.
- g) Usos mineros.
- h) Usos recreativos comunitarios.
- i. Usos recreativos individuales.

Ahora, de acuerdo con lo consignado la demanda hídrica de un área objeto de análisis se estima como la sumatoria de la demanda derivada por cada sector socioeconómico.

$$Dh = Ch + Csp + Csm + Ccss + Cea + Ca + Aenc$$

Donde:

*Dh*: Demanda hídrica.

*Ch*: Consumo humano.

*Csp*: Consumo del Sector agrícola.

*Csm*: Consumo del sector industrial.

*Ccss*: Consumo del sector servicios.

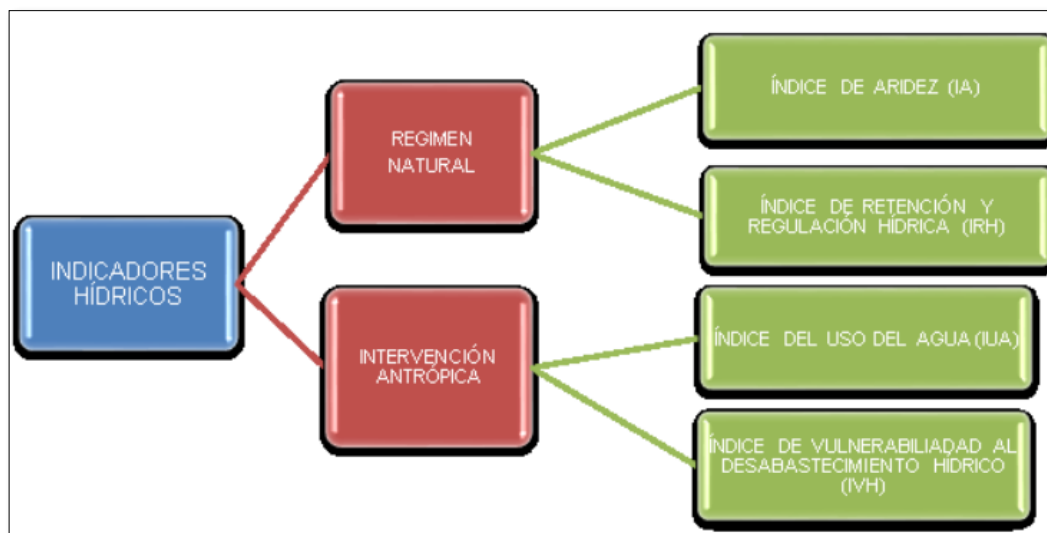
*Ce*: Consumo del sector energía.

*Ca*: Consumo del sector acuícola.

*Aenec*: Agua extraída no consumida.

### **Indicadores hídricos**

Para explicar el estado en lo referente a la cantidad del agua en el territorio Nacional el IDEAM desarrolló el “Sistema de indicadores hídricos”, asociados al régimen natural y a la intervención antrópica.



**Figura 2-1. Indicadores del régimen hídrico**

**Fuente:** Adaptado IDEAM, 2010

### **Clasificación y definición conceptual de indicadores hídricos**

**Índice de retención y regulación hídrica (IRH):** Índice que resulta de la relación entre el volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio y el área bajo la curva de duración de caudales diarios (IDEAM, 2010).

El IDEAM, 2010, agrupó en rangos el índice de retención y regulación hídrica – IRH, y a cada rango le asignó una calificación cualitativa (Tabla 2-1).

**Tabla 2-1. Clasificación de los rangos de valores del IRH**

<b>RANGOS DE VALORES DEL INDICADOR</b>	<b>CALIFICACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
>0,85	Muy alta	Muy alta retención y regulación de humedad
0,75 – 0,85	Alta	Alta retención y regulación de humedad
0,65 – 0,75	Moderada	Media retención y regulación de humedad media

0,50 – 0,65	Baja	Baja retención y regulación de humedad
<0,50	Muy baja	Muy baja retención y regulación de humedad

Fuente: IDEAM, 2010

**Índice del uso del agua (IUA):** La cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en una unidad espacial de análisis (*área, zona, subzona, etc.*) en relación con la oferta hídrica superficial disponible (IDEAM, 2010)

Su cálculo se realiza mediante la aplicación de la siguiente expresión matemática:

$$IUA = \left( \frac{Dh}{Oh} \right) \times 100$$

Donde:

**Dh:** Demanda hídrica sectorial.

**Oh:** Oferta hídrica superficial disponible (resultado de la oferta hídrica natural o total menos la cantidad de agua designada como caudal ambiental).

En la tabla 2-2 se presentan los rangos y las categorías para el IUA (*Índice del uso del agua*) propuesto por el IDEAM, 2015.

**Tabla 2-2. Clasificación de los rangos de valores del IRH**

Rango	Categoría IUA	Significado
>100	Crítico	La presión supera las condiciones de la oferta
50.01-100	Muy Alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
20.01 – 50	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
10,01 – 20	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
1-10	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
<1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

Fuente: IDEAM, 2015

**Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico (IVH):** Es la fragilidad que tiene un sistema hídrico para mantener una oferta para el abastecimiento de agua.

Para la determinación del IVH, el IDEAM, 2015 establece una matriz en la que son relacionados los rangos del índice de retención y regulación hídrica (IRH) y el índice del uso del agua (IUA) tal como se presenta a continuación

**Tabla 2-3. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico (IVH)**

IUA		ÍNDICE DE REGULACIÓN			
Rango	Categoría	Alta	Moderado	Baja	Muy baja
< 1	Muy bajo	Muy baja	Baja	Media	Media
1 - 10	Bajo	Baja	Baja	Media	Media
10 - 20	Moderado	Media	Media	Alta	Alta
20 - 50	Alto	Media	Alta	Alta	Muy Alta
50 - 100	Muy alto	Media	Alta	Alta	Muy Alta
> 100	Critico	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Muy alta

**Fuente:** IDEAM, 2015.

## 2.2. MARCO TEÓRICO

### Modelo hidrológico SWAT

SWAT (Soil Water Assesment Tool o Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua) ha sido desarrollado por Dr. Jeff Arnold y por la Universidad de Texas A&M (TAMU) para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), con el objetivo de predecir el impacto de las prácticas del manejo de suelo en la generación de agua, en cuencas grandes y complejas con variedad de suelos, uso y condiciones de manejo en un tiempo prolongado (Uribe, 2010)

Es un modelo matemático de simulación que permite la representación de cuencas y sistemas reales de forma aproximada y simplificada, permitiendo conocer la dinámica hídrica de estas. (INGEOEXPERT, 2018). Modela de forma integral no solamente escenarios actuales, sino que además tiene la posibilidad de predecir impactos sobre cuencas grandes como resultado de por ejemplo la intervención de los usos del suelo y la influencia que sobre



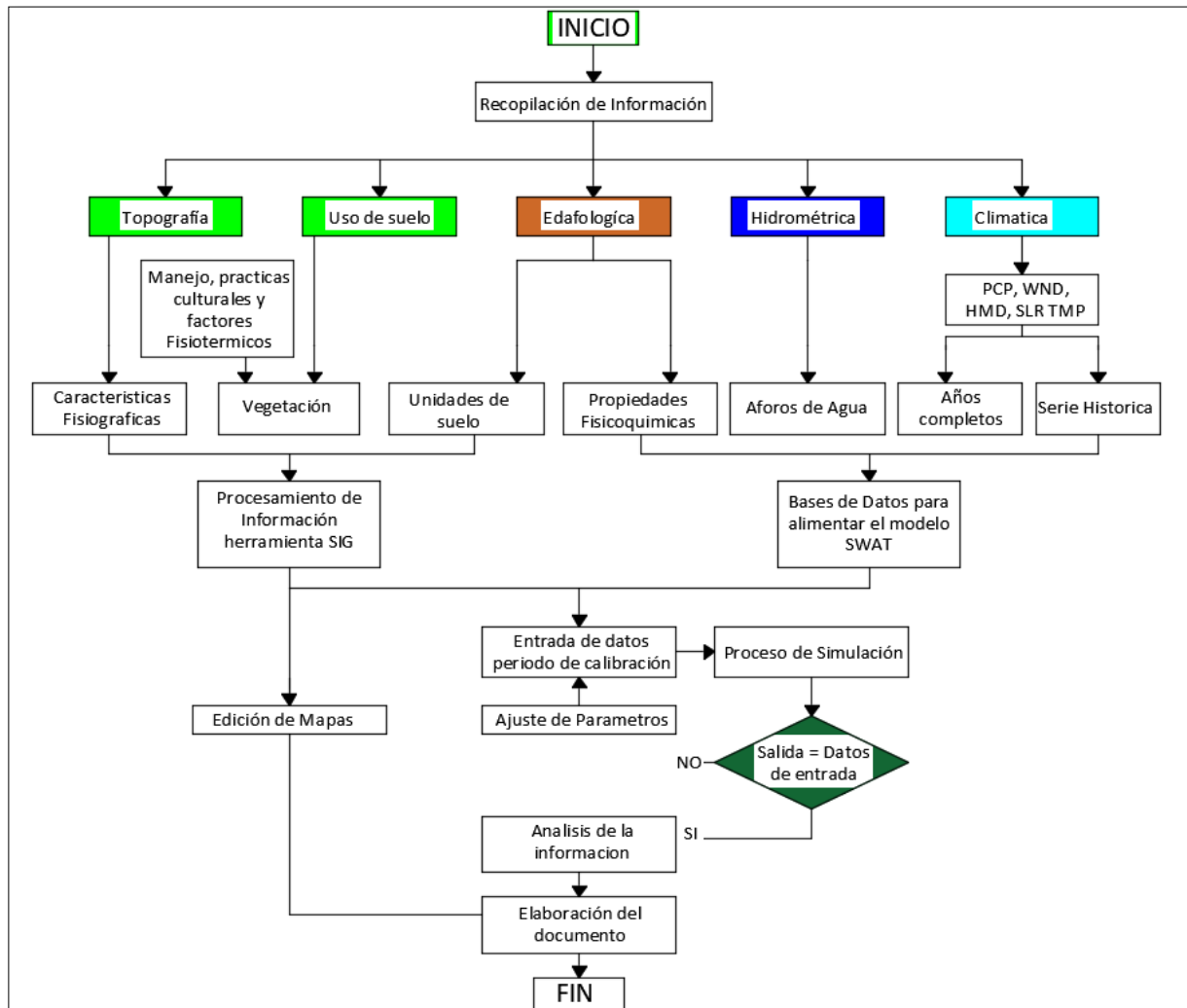
la hidrología puede llegar a tener el cambio climático. Adicional SWAT es un modelo continuo de tiempo; es decir, está diseñado no para simular procesos detallados de corto plazo, sino que es eficiente en la simulación de sucesos de largo plazo.

No es un programa de funcionalidad independiente, más bien marcha como una extensión o complemento de un sistema de información geográfico y su programación ha sido desarrollada en una combinación de lenguas: una parte con .NET de Microsoft y la otra en lenguaje Fortran (Photran, gfortran, MakeFile, Eclipse, MinGW y otros).

A continuación, se listan algunas de las ventajas de SWAT señaladas por (INGEOEXPERT, 2018).

- Es sencillo delimitar las cuencas en el espacio de estudio con los modelos digitales de elevación (disponibles de forma pública y en alta calidad).
- Los límites de la cuenca están en relación directa y natural con los procesos y características del ecosistema.
- Las sub cuencas están relacionadas jerárquica y sistemáticamente, lo que facilita trabajar de forma intuitiva a diferentes escalas.
- El concepto de cuenca es un concepto popular entendible por la mayoría de las personas.
- La ventaja de operación del modelo SWAT radica en su interacción con los Sistemas de Información Geográfica y, con ello, el uso de mapas digitales y bases de datos, lo cual hace más fácil el despliegue y análisis de los datos de salida para las posteriores tomas de decisiones, así como la preparación de un modelo a partir de datos ya recogidos.

En la figura 3 se muestra la metodología general para realizar una simulación en SWAT



**Figura 2-2. Metodología para una simulación con SWAT**

**Fuente:** Uribe, 2010

SWAT basa su funcionamiento en la estimación de un balance hídrico para así determinar la entrada, salida y el almacenamiento de agua en una cuenca hidrográfica, por lo cual es considerado para el desarrollo del presente trabajo, ya que con la implementación de este se espera generar resultados de la oferta hídrica superficial total para el río Aipe y cada uno de las microcuencas delimitadas.

La implementación del modelo hidrológico SWAT contempla el uso de información espacial de la subcuenca objeto de análisis tal como: cobertura vegetal o uso del suelo, red hidrometeorológico, unidades cartográficas de suelos y pendiente. Y también requiere de información temporal como: clima (precipitación diaria, temperatura diaria máxima y mínima, caudales diarios, radiación solar, velocidad del viento, brillo solar).

### **Características fisiográficas y morfométricas**

De acuerdo con lo planteado por Monsalve, 1995, las características físicas de una cuenca hidrográfica dependen de la morfología, tipos de suelo, la capa vegetal, la geología, las prácticas agrícolas, entre otros y esta es información que da conocimiento de la variación espacial de los elementos del régimen hidrológico.

A continuación, se determinan algunos elementos físicos, de relieve y de forma de la subcuenca hidrográfica del río Aipe, así como de sus principales tributarios, teniendo en cuenta que dicha subdivisión interna se realiza con base en el proyecto preliminar de Zonificación Hidrográfica que se adelanta por parte de la CAM para todo el departamento del Huila.

### **Características físicas**

**Área:** Monsalve 1995, define el área de una cuenca hidrográfica como el área plana (proyección horizontal), incluida dentro de su divisoria topográfica. Por su parte, la divisoria

topográfica también conocida como parteaguas o divisoria de aguas, hace referencia a la línea que limita una cuenca hidrográfica de otra contigua.

**Perímetro:** El perímetro hace referencia a la longitud de la línea que delimita el área de cada una de las unidades de estudio y es un parámetro de suma importancia porque su relación con el área es determinante al momento de definir la forma de la cuenca.

**Longitud axial de la cuenca:** Es la longitud de una línea recta con dirección “paralela” al cauce principal trazada desde la desembocadura hasta la cabecera más distante de la cuenca.

**Ancho de la cuenca:** Parámetro que hace referencia a la relación entre el área de drenaje de la cuenca y la longitud de la misma.

### **Relieve de la cuenca**

**Pendiente media:** La pendiente es la variación de la inclinación de una cuenca, su determinación es importante para definir el comportamiento de la cuenca respecto al desplazamiento de las capas de suelo (erosión o sedimentación), puesto que, en zonas altas pendientes se presentan con mayor frecuencia los problemas de erosión; mientras que en regiones planas aparecen principalmente de drenaje y sedimentación.

La pendiente media de la cuenca, hace referencia a la media ponderada de todas las pendientes de las superficies elementales en las que se considera constante la máxima pendiente. Esta característica controla en buena parte la velocidad con que se da la escorrentía superficial y afecta, por tanto, el tiempo que lleva el agua de la lluvia para concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenaje (Monsalve, 1995).

El IGAC, 1999 establece la siguiente escala para la clasificación del relieve de acuerdo con la pendiente del terreno.

**Tabla 2-4. Clasificación del relieve de acuerdo con pendiente**

<b>PENDIENTE (%)</b>	<b>CLASIFICACIÓN DEL RELIEVE</b>
0 – 3	Plano a ligeramente plano
3 - 7	Ligeramente inclinado

PENDIENTE (%)	CLASIFICACIÓN DEL RELIEVE
7 - 12	Moderadamente inclinado
12 - 25	Fuertemente Inclínada
25 - 50	Ligeramente escarpada o ligeramente inclinada
50 – 75	Moderadamente escarpada o Moderadamente. empinada
>75	Fuertemente escarpada o Fuertemente. empinada

**Fuente:** IGAC, 1999

## Parámetros de forma

**Índice de compacidad o coeficiente de Gravelius (Kc):** Parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo de igual área que el de la cuenca. Para su estimación se hace uso de la siguiente expresión matemática

$$K_c = 0.2821 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Dónde:

P: Perímetro de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Este valor adimensional, independiente del área estudiada tiene por definición un valor de 1 para cuencas imaginarias de forma exactamente circular. Los valores de Kc nunca serán inferiores a 1. El grado de aproximación de este índice a la unidad indicará la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, siendo más acentuado cuando más cercano sea a la unidad, lo cual quiere decir que entre más bajo sea Kc mayor será la concentración de agua. Existen cuatro categorías para la clasificación según el valor de este parámetro.

**Tabla 2-5. Índice de Gravelius para la evaluación de la forma**

CLASE	RANGO	DESCRIPCIÓN
Kc 1	1.00 – 1.25	Casi redonda a Oval redonda
Kc 2	1.25 – 1.50	Oval redonda a Oval oblonga
Kc 3	1.50 – 1.75	Oval oblonga a Rectangular oblonga

CLASE	RANGO	DESCRIPCIÓN
Kc 4	> 1.75	Rectangular a Muy lobuladas

**Fuente:** LONDOÑO, 2001

### Factor de forma

El factor de forma es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud axial de la cuenca hidrográfica tal y como se muestra en la siguiente expresión:

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

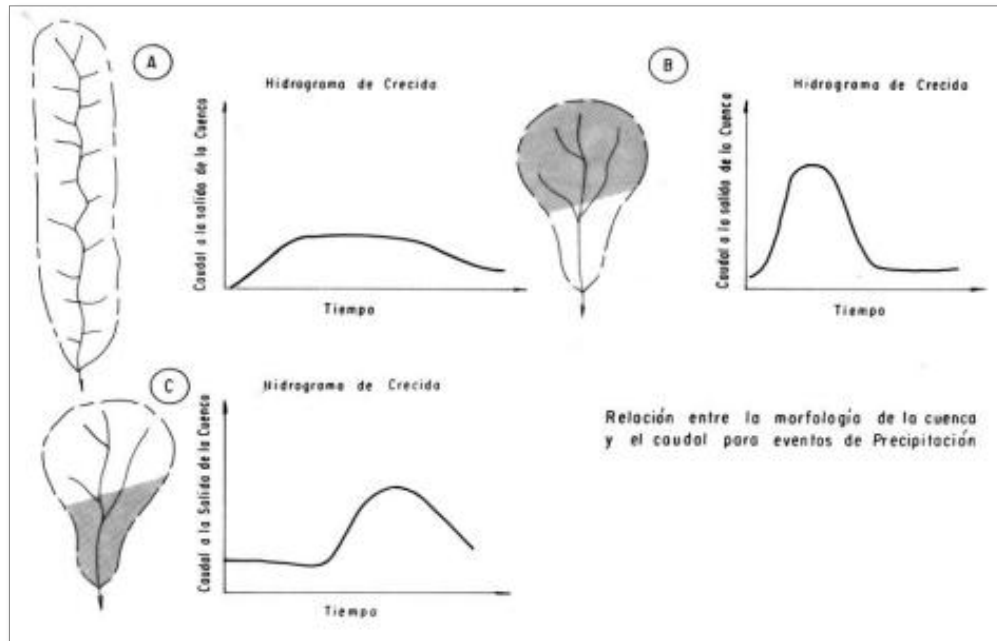
En la medida que el área es más grande el factor de forma disminuye, indicándose con ello una tendencia a una forma alargada. En la siguiente tabla se muestran los valores interpretativos para el factor de forma.

**Tabla 2-6. Valores interpretativos del factor de forma**

RANGO	DESCRIPCIÓN
<0.22	Muy alargada
0.22 – 0.30	Alargada
0.30 – 0.37	Ligeramente alargada
0.37 – 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 – 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 – 0.80	Ensanchada
0.80 – 1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

**Fuente:** LONDOÑO, 2001

En la figura 2-3 se muestra la relación existente entre la forma de la cuenca y su influencia en la respuesta hidrológica de la misma.



**Figura 2-3. Relación entre la forma de la cuenca hidrográfica y caudales pico**

**Fuente:** BELL, 1999

De acuerdo con lo mostrado se tiene que en la medida en que la cuenca hidrográfica adopta una forma alargada; es decir, el factor de forma es bajo, su propensión a la ocurrencia de crecientes de gran magnitud también es baja.

### Índice de alargamiento

Este índice relaciona la longitud axial de la cuenca hidrográfica con su ancho máximo.

$$I_a = \frac{L}{a}$$

Donde

Ia: Índice de alargamiento

L: Longitud axial

A: Ancho máximo de la cuenca

En la tabla 2-7 se presenta las interpretaciones para el índice de alargamiento.

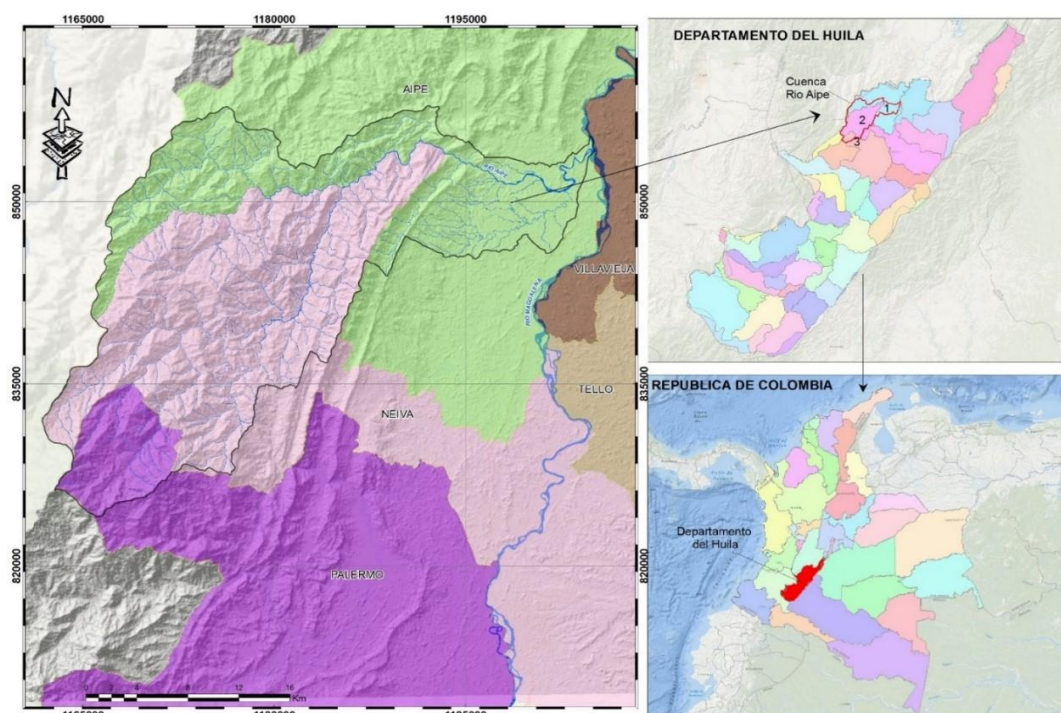
**Tabla 2-7. Valores interpretativos del índice de alargamiento**

RANGO	DESCRIPCIÓN
<1.4	Poco alargada
1.5 – 2.8	Moderadamente alargada
>2.9	Muy alargada

**Fuente:** LONDOÑO, 2001

### 2.3. MARCO GEOGRÁFICO

La subcuenca hidrográfica del río Aipe se localiza en la región noroccidental del departamento del Huila. Limita al norte con la microcuenca hidrográfica de la quebrada Bambucá y la subcuenca hidrográfica del río Pata, al sur con la subcuenca hidrográfica del Río Bache, al occidente con el departamento del Tolima y al oriente desemboca su principal afluente hídrica sobre la margen izquierda del río Magdalena. Su localización general se presenta en la figura 3



**Figura 2-4. Localización general de la subcuenca hidrográfica del río Aipe**

**Fuente:** Autor, 2019



Por otra parte, teniendo en cuenta la zonificación hidrográfica regional, elaborada por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena -CAM con apoyo de la cartografía base oficial del IGAC y de la zonificación hidrográfica nacional propuesta por el IDEAM, 2013, se tiene que la subcuenca hidrográfica del río Aipe pertenece al área hidrográfica **Magdalena – Cauca**, zona hidrográfica **Alto Magdalena**, sub zona hidrográfica **Río Aipe, Río Chenche y otros directos al Magdalena**. La información de la estructura hidrográfica de la subcuenca se describe a continuación:

**Tabla 2-8. Codificación de la subcuenca hidrográfica del río Aipe**

<i><b>TIPO</b></i>	<i><b>NOMBRE</b></i>	<i><b>CÓDIGO</b></i>
<b>Área Hidrográfica</b>	MAGDALENA - CAUCA	<b>2</b>
	ALTO MAGDALENA	<b>1</b>
<b>Subzona</b>	Río Aipe, Río Chenche y otros directos al Magdalena	<b>13</b>
<b>Nivel subsiguiente</b>	Río Aipe	<b>4</b>
<b>Microcuenca</b>	-----	<b>0</b>

**Fuente:** IDEAM, 2013.

El área de la cuenca hidrográfica es de 663,5 km<sup>2</sup> y la mayor parte de su extensión, aproximadamente 364 km<sup>2</sup>, es decir, un 55% se localiza en el municipio de Neiva, un 35,4% se localiza en jurisdicción del municipio de Aipe y el área restante se localiza en el municipio de Palermo.

Su afluente principal nace en el municipio de Palermo a una altura de aproximadamente 2030 m.s.n.m. Su recorrido es de 87,3 km de sur occidente a nor oriente pasando por los municipios de Neiva y Aipe y desemboca sus aguas finalmente sobre la margen izquierda del río Magdalena a una altura aproximada de 360 m.s.n.m.

La subcuenca hidrográfica reviste una gran importancia, no solo por el beneficio que otorga a los predios localizados en sus vertientes al ser el proveedor de caudal para el riego de cultivos como el arroz, sino principalmente por ser la fuente que abastece el acueducto de la zona urbana del municipio de Aipe. La extensión de la subcuenca hidrográfica del río Aipe la conforman un

total de 19 microcuencas, estas se relacionan en la tabla 2-5 y se agrupan de acuerdo con el municipio que tiene jurisdicción sobre las mismas.

**Tabla 2-9. Microcuencas que conforman la subcuenca hidrográfica del río Aipe**

Palermo	Neiva															Aipe						
Q. Aguache	Q. El Conejo-Neiva	Q. Aipecito	Q. Miel De Abejas	Q. Jeronimo	Q. Los Organos	Q. Aguache	Q. Buenavaquera	Q. Tinail	Q. El Tambo	Q. El Chocho	Q. Mangas	Q. La Sardina-Neiva	Q. Carbonera	Q. Tambilla	R. Cachichi	Q. Muchubi	Q. Mangas	Q. Pipilicua	Q. San Francisco	Q. Guayabero	Q. Tambilla	R. Cachichi

**Fuente:** Autor, 2019.

### 3. METODOLOGÍA

El presente trabajo de grado se desarrolló mediante la ejecución de las siguientes fases

#### 3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

En esta fase se procedió a recopilar toda la información primaria y secundaria disponible relacionada con la cuenca hidrográfica del río Aipe y requerida para el cumplimiento de los objetivos propuestos. En este sentido, la información se refiere a:

- Cartografía básica del IGAC.
- Mapas de cobertura vegetal y de unidades cartográficas de suelos
- Modelos de elevación digital (MED)
- Información hidroclimatológica (series climáticas e hidrológicas)
- Inventario de usos de agua legalizados ante la CAM con concesión de aguas.
- Planes de ordenamiento territorial de los municipios de Palermo, Neiva y Aipe
- Instrumentos de planificación del recurso hídrico de la subcuenca hidrográfica del río Aipe.
- 

#### 3.2. ANALISIS DE INFORMACIÓN

Teniendo en cuenta toda la información recopilada se procedió a realizar la respectiva revisión de la calidad y análisis derivados de la misma.

**Cartografía:** Toda la información relacionada con mapas fue compilada en un base de datos con la ayuda del programa ArcGis y con sus herramientas se generaron las salidas requeridas por el software de modelación hidrológica SWAT. También, con base en la cartografía disponible y el DEM con precisión de 12.5m se estimaron las principales características morfométricas de la subcuenca hidrográfica del río Aipe y la topología de su red.

***Series hidroclimáticas:*** se realizó el respectivo análisis de la variación temporal de las series por medio de gráficas y, análisis espacial mediante la generación de mapas y se organizó la información de acuerdo con formatos requeridos por SWAT.

### 3.3. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Durante esta etapa se ejecutó la modelación hidrológica de la subcuenca hidrográfica del río Aipe con la extensión QSwat instalada en QGis, tal y como se describe a continuación:

- ***Creación del proyecto:*** inicialmente se creó el archivo que contiene toda la información relacionada con la modelación.
- ***Delimitación de la cuenca hidrográfica:*** Mediante el módulo Watershed Delineator y considerando como información de entrada el Modelo de Elevación Digital, corregido con la herramienta Fill, se generó la red de drenaje, la cuenca y la subcuencas hidrográficas que la componen.
- ***Definición del suelo, cobertura y pendientes:*** mediante el módulo HRU Analysis, se cargó la información de características del suelo, cobertura y pendiente y se determinaron las combinaciones y distribuciones existentes entre los mismos. Esta información se tabula previamente y se almacenan en bases de datos.
- ***Ingreso de datos meteorológicos:*** la información relacionada con las estaciones meteorológicas, así como de variables climáticas registradas por las mismas previamente se almacenó en bases de datos y con la ayuda del módulo Weather Data Definition, se ingresaron al modelo.
- ***Simulación:*** Finalmente, luego de cargada toda la información requerida por el modelo se ejecutan las simulaciones

### **3.4. ESTIMACIÓN DE INDICADORES HÍDRICOS**

Con base en las metodologías ya enunciadas para el cálculo de los indicadores hídricos y teniendo ya disponible toda la información requerida, se procedió a la estimación de los mismos y a la interpretación de los resultados alcanzados.

### **3.5. PROPUESTA DE ESTRATEGIA DE PLANIFICACIÓN**

Como última etapa del proyecto, se realiza la entrega del documento final, como insumo para la planificación del recurso hídrico, priorización de acciones de adaptación y/o mitigación y toma de decisiones por parte de la autoridad ambiental competente, que para este caso corresponde a la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena, la cual es la encargada de aplicar estrategias que eviten un posible desabastecimiento del recurso hídrico en años futuros.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA SUBCUENCA

#### 4.1.1. Localización

Como ya se había mencionado en el aparte 2.3. Marco Geográfico del presente documento, el área de estudio se refiere a la subcuenca hidrográfica del río Aipe ubicado en los municipios de Aipe, Neiva y Palermo del departamento del Huila.

#### 4.1.2. Caracterización fisiográfica y morfométrica

##### Características físicas

En la tabla 4-1 se consignan las características físicas estimadas para las unidades de análisis de la subcuenca hidrográfica del río Aipe.

**Tabla 4-1. Área, perímetro, longitud axial, ancho y pendiente de las unidades de estudio de la subcuenca hidrográfica del río Aipe**

No.	NOMBRE	AREA (Km <sup>2</sup> )	PERIMETRO (Km)	LONGITUD AXIAL DE LA CUENCA (Km)	ANCHO DE LA CUENCA (Km)
1	Rio Aipe	663.50	158.48	50.00	13.27
2	Q. Aguache	27.94	30.0	12.16	2.30
3	Q. Aipecito	47.99	39.5	15.17	3.16
4	Q. Jeronimo	20.58	20.5	5.44	3.78
5	Q. El Tambo	5.19	10.7	2.92	1.78
6	Q. El Conejo-Neiva	9.39	15.5	5.28	1.78
7	R. Cachichi	72.36	61.4	19.44	3.72
8	Q. Pipilicua	15.53	23.5	8.11	1.92
9	Q. Los Organos	35.27	29.8	7.78	4.53
10	Q. Buenavaquera	14.02	16.6	5.53	2.54

No.	NOMBRE	AREA (Km <sup>2</sup> )	PERIMETRO (Km)	LONGITUD AXIAL DE LA CUENCA (Km)	ANCHO DE LA CUENCA (Km)
11	Q. Tinail	6.14	11.3	3.83	1.60
12	Q. Miel De Abejas	8.53	15.2	4.06	2.10
13	Q. La Sardina	9.64	16.6	4.49	2.15
14	Q. Carbonera	2.84	8.1	3.49	0.81
15	Q. El Chocho	6.24	12.1	5.1	1.22
16	Q. Tambilla	18.49	26.6	10.43	1.77
17	Q. Muchubi	47.39	37.1	11.87	3.99
18	Q. Mangas	40.51	40.0	13.22	3.06
19	Q. Guayabero	16.47	21.4	5.98	2.75
20	Q. San Francisco	48.43	31.0	10.42	4.65

Fuente: Autor, 2019

## Característica del relieve

### Pendiente

Con base en las alturas disponibles en el modelo digital de elevación para la zona de estudio se estima la pendiente media de las unidades de análisis de la subcuenca hidrográfica del río Aipe (Tabla 4-2)

**Tabla 4-2. Pendiente media de las unidades de estudio de la subcuenca hidrográfica del río Aipe**

No.	NOMBRE	PENDIENTE MEDIA (%)	CLASIFICACIÓN
1	Rio Aipe	40.00	Ligeramente escarpada o ligeramente inclinada
2	Q. Aguache	42.19	
3	Q. Aipecito	42.50	
4	Q. Jeronimo	46.73	
5	Q. El Tambo	59.10	Moderadamente escarpada o Moderadamente. empinada
6	Q. El Conejo-Neiva	52.58	
7	R. Cachichi	41.42	Ligeramente escarpada o ligeramente inclinada
8	Q. Pipilicua	48.04	
9	Q. Los Organos	44.37	
10	Q. Buenavaquera	30.28	
11	Q. Tinail	45.02	
12	Q. Miel De Abejas	46.51	
13	Q. La Sardina	52.02	Moderadamente escarpada o Moderadamente. empinada

No.	NOMBRE	PENDIENTE MEDIA (%)	CLASIFICACIÓN
14	Q. Carbonera	49.06	Ligeramente escarpada o ligeramente inclinada
15	Q. El Chocho	56.56	Moderadamente escarpada o Moderadamente. empinada
16	Q. Tambilla	44.64	Ligeramente escarpada o ligeramente inclinada
17	Q. Muchubi	11.19	Moderadamente inclinado
18	Q. Mangas	39.56	Ligeramente escarpada o ligeramente inclinada
19	Q. Guayabero	39.73	
20	Q. San Francisco	33.73	

Fuente: Autor, 2019

La pendiente media de la subcuenca hidrográfica del río Aipe es del 40% que indica un relieve ligeramente escarpado o ligeramente inclinado que propicia el fácil escurrimiento superficial y evita zonas de encharcamiento. En las microcuencas de las quebradas El Tambo, El Conejo, La Sardina y El Chocho el relieve se categoriza como moderadamente escarpado o moderadamente empinado.

### Parámetros de forma

A continuación, se muestran los valores obtenidos para el índice de Gravelius (tabla 4-3), factor de forma (tabla 4-4), e índice de alargamiento (tabla 4-5), de la unidades de estudio de la subcuenca hidrográfica del río Aipe.

**Tabla 4-3. Índice de Gravelius de las unidades de estudio de la subcuenca hidrográfica del río Aipe**

No.	NOMBRE	INDICE DE GRAVELIUS	CLASIFICACIÓN
1	Rio Aipe	1.74	Oval oblonga a Rectangular oblonga
2	Q. Aguache	1.60	Oval oblonga a Rectangular oblonga
3	Q. Aipecito	1.61	Oval oblonga a Rectangular oblonga
4	Q. Jeronimo	1.27	Oval redonda a Oval oblonga
5	Q. El Tambo	1.32	Oval redonda a Oval oblonga
6	Q. El Conejo-	1.43	Oval redonda a Oval oblonga
7	R. Cachichi	2.04	Rectangular a Muy lobuladas
8	Q. Pipilicua	1.68	Oval oblonga a Rectangular oblonga
9	Q. Los Organos	1.42	Oval redonda a Oval oblonga
10	Q. Buenavaquera	1.25	Casi redonda a Oval redonda
11	Q. Tinail	1.29	Oval redonda a Oval oblonga
12	Q. Miel De Abejas	1.46	Oval redonda a Oval oblonga



<b>No.</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>INDICE DE GRAVELIUS</b>	<b>CLASIFICACIÓN</b>
13	Q. La Sardina	1.50	Oval redonda a Oval oblonga
14	Q. Carbonera	1.35	Oval redonda a Oval oblonga
15	Q. El Chocho	1.37	Oval redonda a Oval oblonga
16	Q. Tambilla	1.75	Oval oblonga a Rectangular oblonga
17	Q. Muchubi	1.52	Oval oblonga a Rectangular oblonga
18	Q. Mangas	1.77	Rectangular a Muy lobuladas
19	Q. Guayabero	1.49	Oval redonda a Oval oblonga
20	Q. San Francisco_	1.26	Oval redonda a Oval oblonga

**Fuente:** Autor, 2019

Puesto que los valores del índice de gravelius para las unidades de estudio son superiores a uno, se determina que la subcuenca hidrográfica no tiende a concentrar fuertes volúmenes de aguas producto de la escorrentía superficial.

**Tabla 4-4. Factor de forma de las unidades de estudio de la subcuenca hidrográfica del río Aipe**

<b>No.</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>FACTOR DE FORMA</b>	<b>CLASIFICACIÓN</b>
1	Rio Aipe	0.27	Alargada
2	Q. Aguache	0.19	muy Alargada
3	Q. Aipecito	0.21	muy Alargada
4	Q. Jeronimo	0.70	Ensanchada
5	Q. El Tambo	0.61	Ensanchada
6	Q. El Conejo-	0.34	Ligeramente alargada
7	R. Cachichi	0.19	muy Alargada
8	Q. Pipilicua	0.24	Alargada
9	Q. Los Organos	0.58	Ligeramente ensanchada
10	Q. Buenavaquera	0.46	Ligeramente ensanchada
11	Q. Tinail	0.42	Ni alargada ni ensanchada
12	Q. Miel De Abejas	0.52	Ligeramente ensanchada
13	Q. La Sardina	0.48	Ligeramente ensanchada
14	Q. Carbonera	0.23	Alargada
15	Q. El Chocho	0.24	Alargada
16	Q. Tambilla	0.17	muy Alargada
17	Q. Muchubi	0.34	Ligeramente alargada
18	Q. Mangas	0.23	Alargada
19	Q. Guayabero	0.46	Ligeramente ensanchada
20	Q. San Francisco_	0.45	Ni alargada ni ensanchada

**Fuente:** Autor, 2019

La subcuenca hidrográfica del río Aipe tiende a ser alargada dado que su factor de forma es bajo, dicha forma determina que la propensión a la ocurrencia de crecientes de carácter torrencial también es baja y que los hidrogramas de crecidas son achatados.

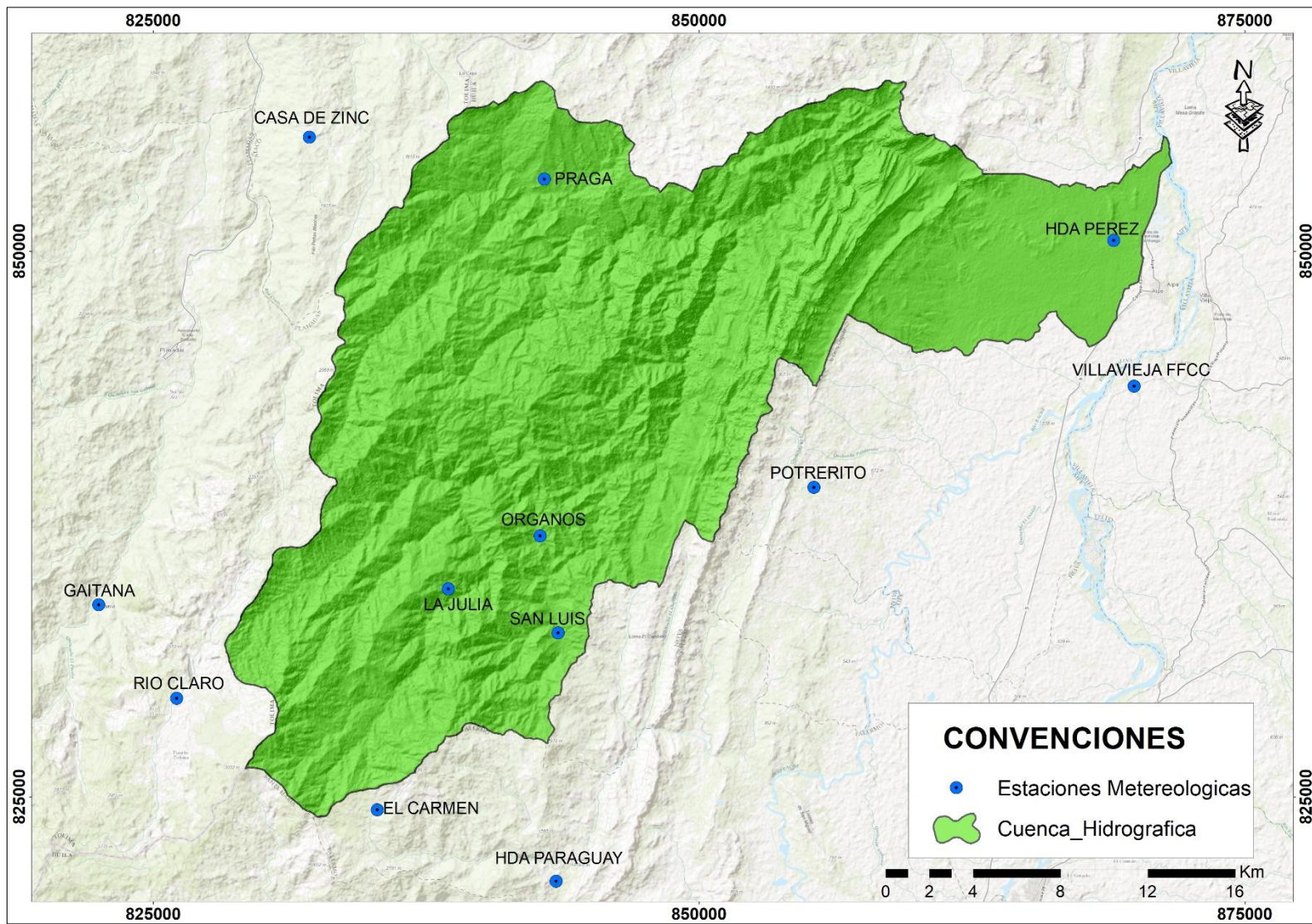
**Tabla 4-5. Índice de alargamiento de las unidades de estudio de la subcuenca hidrográfica del río Aipe**

<b>No.</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>INDICE DE ALARGAMIENTO</b>	<b>CLASIFICACIÓN</b>
1	Rio Aipe	3.77	Muy alargada
2	Q. Aguache	5.29	Muy alargada
3	Q. Aipecito	4.80	Muy alargada
4	Q. Jeronimo	1.44	Moderadamente alargada
5	Q. El Tambo	1.64	Moderadamente alargada
6	Q. El Conejo-	2.97	Muy alargada
7	R. Cachichi	5.22	Muy alargada
8	Q. Pipilicua	4.23	Muy alargada
9	Q. Los Organos	1.72	Moderadamente alargada
10	Q. Buenavaquera	2.18	Moderadamente alargada
11	Q. Tinail	2.39	Moderadamente alargada
12	Q. Miel De Abejas	1.93	Moderadamente alargada
13	Q. La Sardina	2.09	Moderadamente alargada
14	Q. Carbonera	4.28	Muy alargada
15	Q. El Chocho	4.17	Muy alargada
16	Q. Tambilla	5.88	Muy alargada
17	Q. Muchubi	2.97	Muy alargada
18	Q. Mangas	4.31	Muy alargada
19	Q. Guayabero	2.17	Moderadamente alargada
20	Q. San Francisco_	2.24	Moderadamente alargada

**Fuente:** Autor, 2019

## **4.2. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA**

El régimen climático es un factor de gran importancia en la determinación del régimen hidrológico de una cuenca hidrográfica, por tanto, es necesario realizar un análisis fiable de las variables climáticas disponibles en la misma. En la figura 4-1 se presentan la localización espacial de las estaciones meteorológicas disponibles en el área de estudio y en cercanías a la misma y en la tabla 4-6 se consignan sus características principales.



**Figura 4-1. Localización espacial de estaciones meteorológicas**

**Fuente:** Autor, 2019

**Tabla 4-61. Estaciones meteorológicas seleccionadas**

No	CODIGO CAT.	NOMBRE	CATEG.	ESTADO	CORRIENTE	DEPTO	MPIO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	FECHA INST.
1	21115080	Villavieja Ffcc	CO	ACT	Magdalena	Huila	Villavieja	3°10'59" N	75°14'51" W	430	15/02/1964
2	21130040	San Luis	PM	ACT	Chiquila	Huila	Neiva	3°4'50.3" N	75°29'4.8" W	1.14	15/08/1971
3	21130110	Praga	PG	ACT	Aipe	Huila	Aipe	3°16'6.9" N	75°29'26.4" W	1.085	15/04/1973
4	21120040	Potrерito	PM	ACT	Bache	Huila	Aipe	3°8'27.9" N	75°22'46.1" W	850	15/04/1989
5	21130050	Perez Hda	PM	ACT	Aipe	Huila	Aipe	3°14'36.8" N	75°15'21.4" W	450	15/07/1966
6	21120010	Paraguay Hda	PM	ACT	Bache	Huila	Palermo	2°58'39.9" N	75°29'7.4" W	1.3	15/11/1986
7	21130080	Organos	PM	ACT	Chiquila	Huila	Neiva	3°7'15" N	75°29'32.1" W	800	15/04/1973
8	21135050	Julia La	CO	ACT	Chiquila	Huila	Neiva	3°5'55.6" N	75°31'48.1" W	1.691	15/12/1986
9	21130060	Carmen El	PM	ACT	Chiquila	Huila	Palermo	3°0'25.7" N	75°33'33.1" W	2.25	15/01/1966
10	22020030	Gaitania	PM	ACT	Ata	Tolima	Planadas	3°5'31.2" N	75°40'26.5" W	1.476	15/12/1973
11	22020040	Casa De Zinc	PM	ACT	Ata	Tolima	Ataco	3°17'8.9" N	75°35'15" W	1.737	15/12/1973
12	22020060	Rioclaro	PM	ACT	Claro	Tolima	Planadas	3°3'12" N	75°38'30.9" W	2.326	15/12/1986

**Fuente:** IDEAM, 2017

Por otro lado, es necesario determinar si la cantidad de estaciones seleccionadas son suficientes para el análisis climático. El IDEAM, 2013 establece la siguiente formulación matemática en la que se calculan las estaciones requeridas en función del área de la zona de estudio.

$$y = 0,0029x + 3,8667$$

Donde:

**Y:** número de estaciones o puestos de monitoreo

**X:** área de la cuenca hidrográfica

$$y = 0,0029(663,5) + 3,8667$$

$$y = 5,8 \approx 6 \text{ estaciones}$$

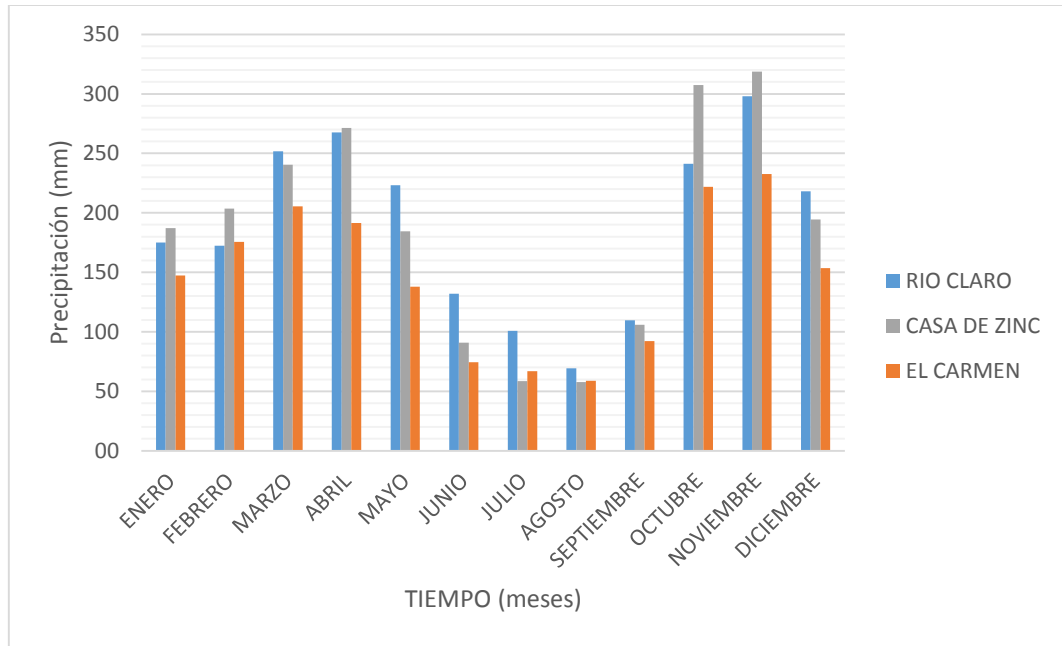
De acuerdo con los resultados se requiere tener dentro de la subcuenca hidrográfica del río Aipe mínimo seis (6) estaciones. En la figura 4-1 se puede apreciar que únicamente se tienen dentro

de esta subcuenca cinco (5) estaciones; sin embargo, en la misma figura se observa que existen siete (7) que, aunque no están dentro del área, si están muy cerca, por lo cual se pueden considerar útiles para el desarrollo del estudio. Ahora bien, de las 12 estaciones disponibles solamente se tienen dos que registran diferentes variables climáticas y de ellas solo una se encuentra dentro de los límites de la subcuenca. Por lo anterior, la precipitación se analiza con base en los registros de doce estaciones, y solamente se analiza la variable temperatura en las dos estaciones que cuentan con esta información.

#### **4.2.1. Precipitación**

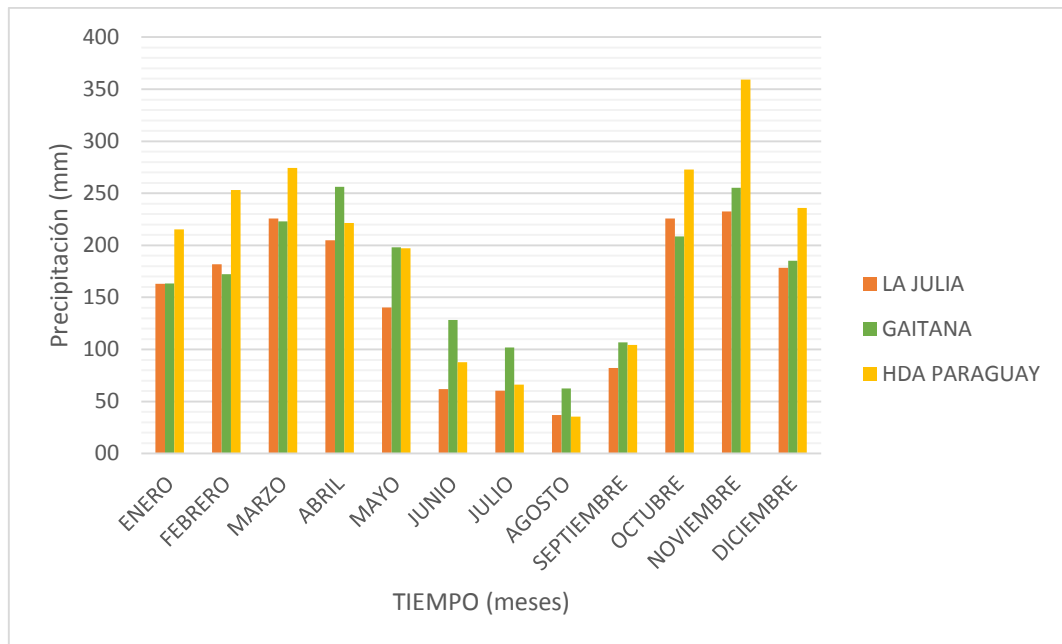
La precipitación es, en general, el término que se refiere a todas las formas de humedad emanada de la atmosfera y depositada en la superficie terrestre, tales como lluvia, granizo, rocío, neblina, nieve o helada (Monsalve, 1995). Esta variable climática refleja el aporte más importante de agua sobre la superficie terrestre, y sus variaciones tanto temporales como espaciales, permiten identificar periodos relacionados con déficit o excesos de agua en una cuenca hidrográfica, puntos de partida para la formulación de proyectos tendientes al uso, control y regulación del recurso hídrico.

La precipitación sufre variaciones en el tiempo, destacándose periodos húmedos seguidos por periodos de sequía, con una tendencia siempre hacia la media. En las siguientes gráficas se representan los valores medios mensuales multianuales de precipitación elaboradas con base en la información diaria registrada por doce (12) estaciones meteorológicas (para una serie con una longitud de 27 años limitada entre los años 1990 hasta el 2016.



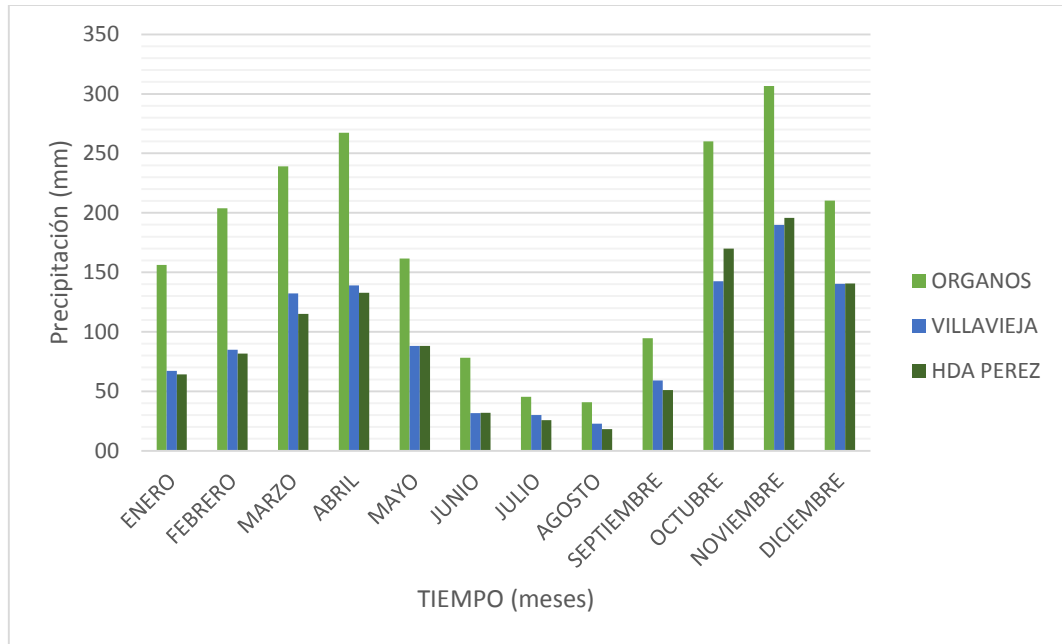
**Gráfica 4-1. Distribución temporal de la precipitación media mensual multianual estaciones Río Claro, Casa de Zinc y El Carmen**

**Fuente:** Autor, 2019



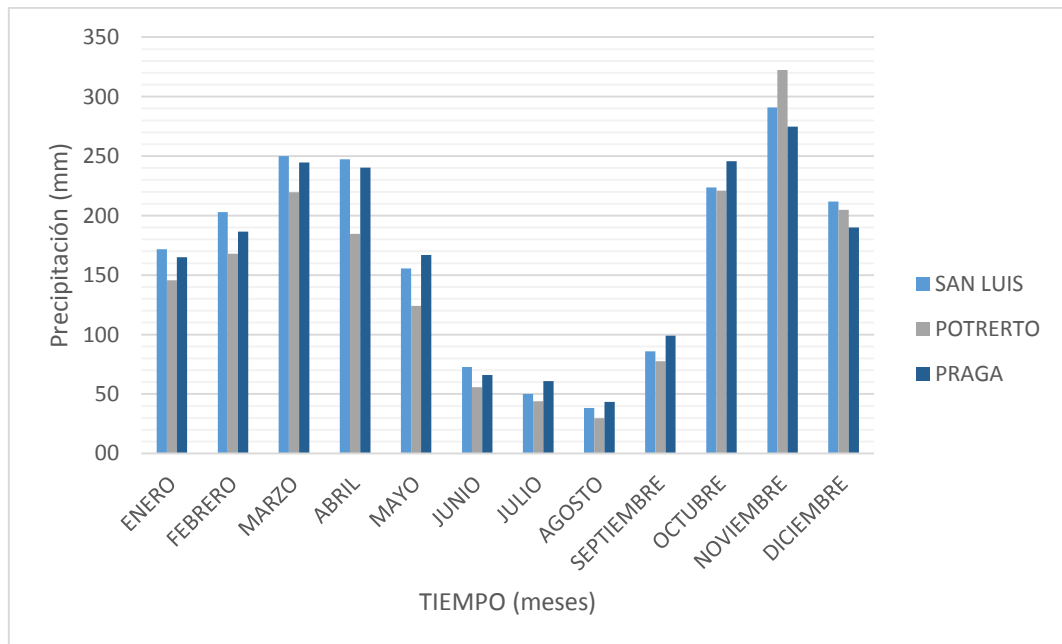
**Gráfica 4-2. Distribución temporal de la precipitación media mensual multianual estaciones La Julia, Gaitana y Hacienda Paraguay**

**Fuente:** Autor, 2019



**Gráfica 4-3 Distribución temporal de la precipitación media mensual multianual estaciones  
Orgános, Villavieja FFCC y Hacienda Perez**

**Fuente:** Autor, 2019



**Gráfica 4-4. Distribución temporal de la precipitación media mensual multianual estaciones San  
Luis, Potrerito y Praga**

**Fuente:** Autor, 2019

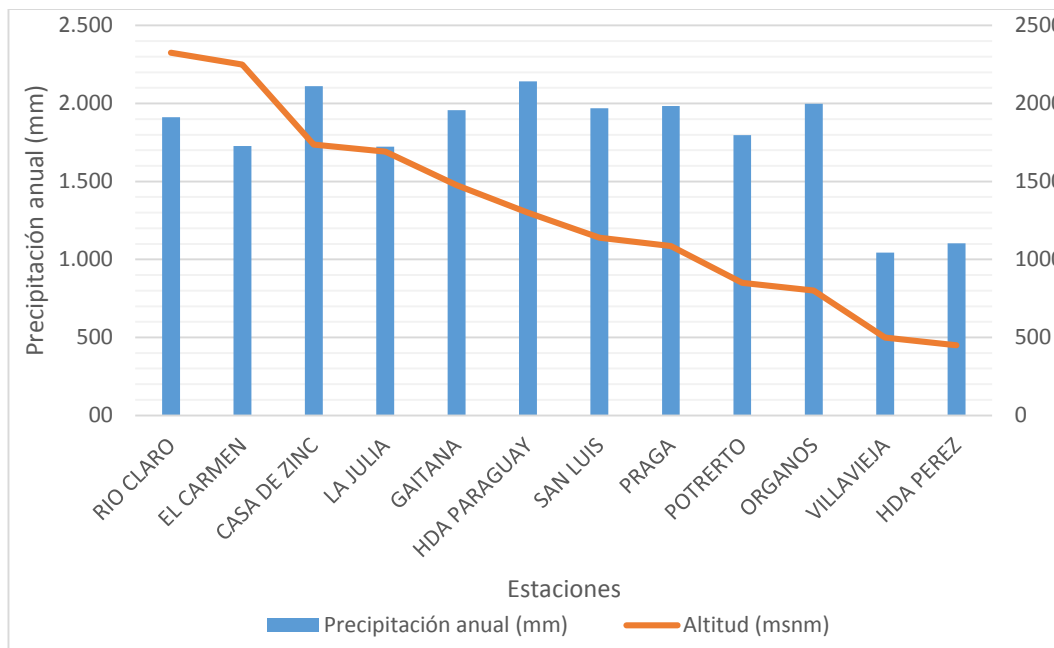
En relación con las gráficas anteriores, se tiene que en todas las estaciones se registró un régimen de precipitación de carácter bimodal, en el que se identifica la ocurrencia de dos periodos secos y dos húmedos y que obedece al desplazamiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT).

Los periodos secos característicos por bajas precipitaciones se presentan para el primer semestre entre diciembre y febrero y para el segundo semestre entre junio y septiembre, siendo en todas las estaciones agosto el mes que presenta un menor valor medio mensual multianual. Por su parte, los periodos húmedos se identifican entre los meses de marzo a mayo y en los meses de octubre y noviembre, siendo noviembre el mes más lluvioso del año.

En los meses menos lluviosos los cultivos absorben el agua del suelo y al no existir esa recarga natural (precipitación) se llega a agotar la capacidad de almacenamiento, por lo cual para no tener pérdidas económicas sobre todo en la agricultura se requiere de la aplicación de grandes cantidades de agua mediante riego. Por otra parte, durante estos mismos meses y a causa de la marcada disminución de precipitación también disminuyen los caudales que discurren por las fuentes hídricas. Por lo anterior, la delimitación de estos periodos secos es de mucha importancia en la planificación de recurso hídrico, porque permite tomar medidas tendientes a administrar el recurso de tal manera que no se afecte la economía de la región ni la dinámica ecosistémica de las fuentes.

Por otra parte, al revisar la gráfica 4-5 se observa que en la zona no existe una relación directa entre la localización altitudinal de las estaciones y los valores medios anuales multianuales de precipitación registrados.





**Gráfica 4-5. Precipitación media anual multianual y localización altitudinal de estaciones meteorológicas.**

**Fuente:** Autor, 2019

Ahora, como no solo es de interés analizar la variación temporal de la precipitación sino también determinar cómo es su distribución en el espacio, partiendo de datos puntuales de pluviómetros ubicados en un área específica, se reconocen tres métodos conocidos como media aritmética, polígonos de Thiessen e Isoyetas. El primero de estos presenta limitaciones en cuanto a la cantidad y distribución de los pluviómetros que se deben considerar para obtener resultados confiables. El segundo, aunque es más preciso que el anterior, no considera de forma directa las influencias de la orografía en la lluvia y se debe construir una red de Thiessen cada vez que haya un cambio en la red de pluviómetros. De acuerdo a lo anterior, se utilizó el método de isoyetas por ser el más preciso, el cual consiste en trazar líneas de igual precipitación utilizando las profundidades de lluvia entre estaciones adyacentes. En la siguiente figura se presenta la distribución espacial de la precipitación media anual multianual en la subcuenca hidrográfica del río Aipe.

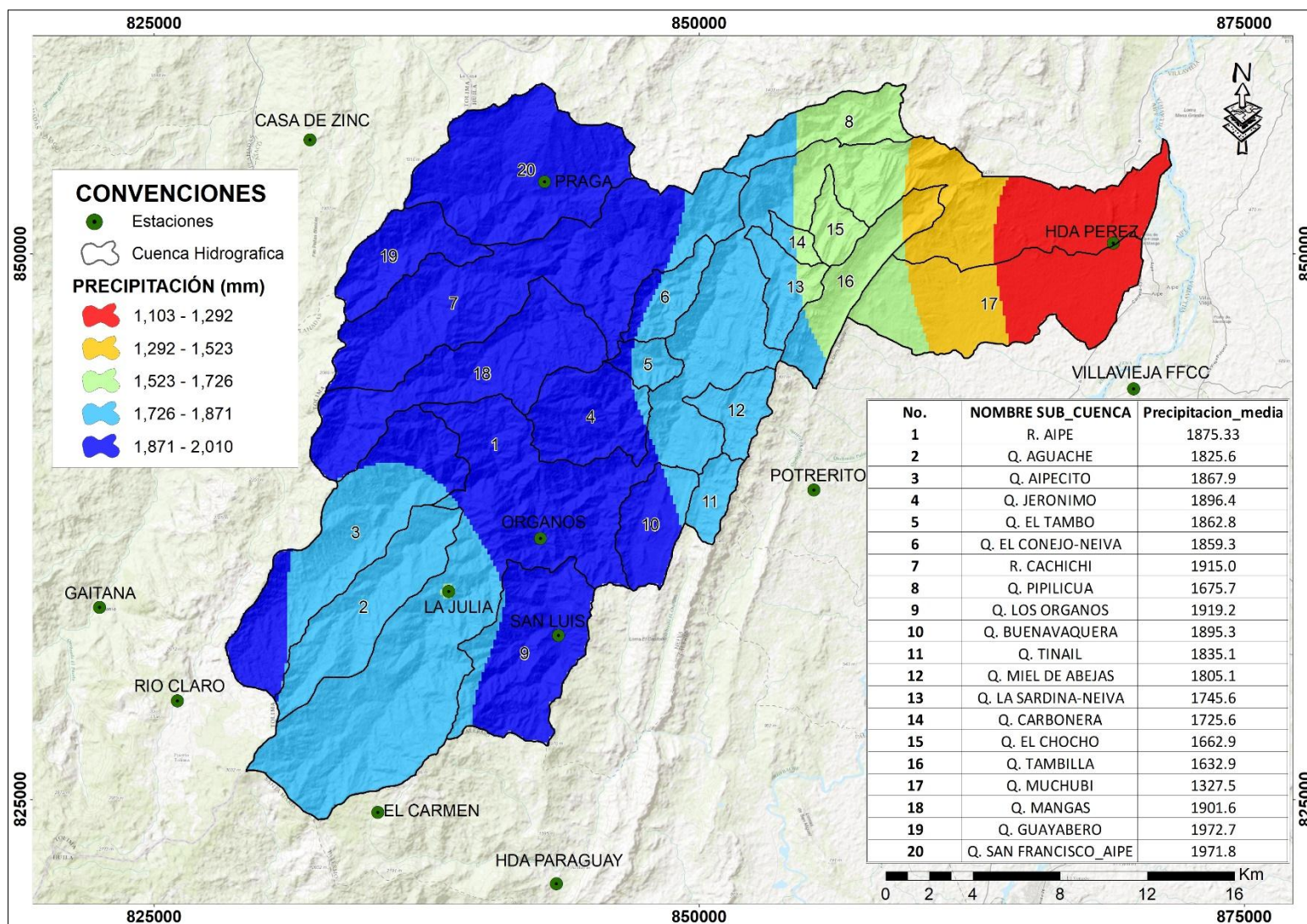


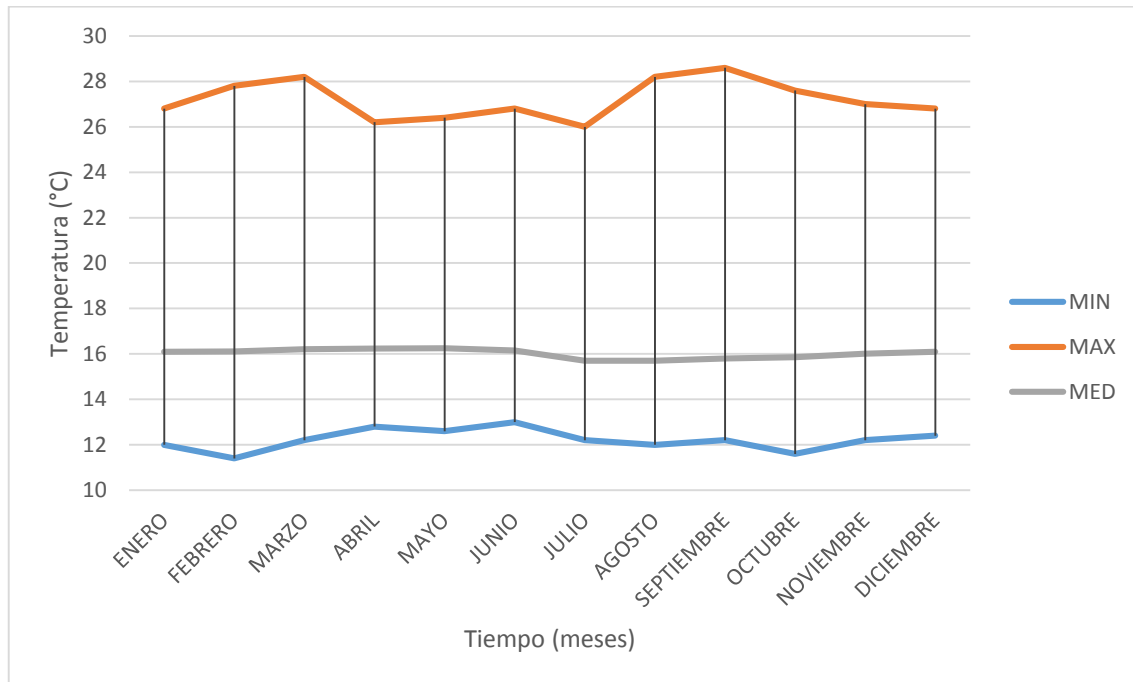
Figura 4-2. Distribución espacial de la precipitación media anual multianual en la subcuenca hidrográfica del río Aipe

Fuente: Autor, 2019

#### 4.2.2. Temperatura

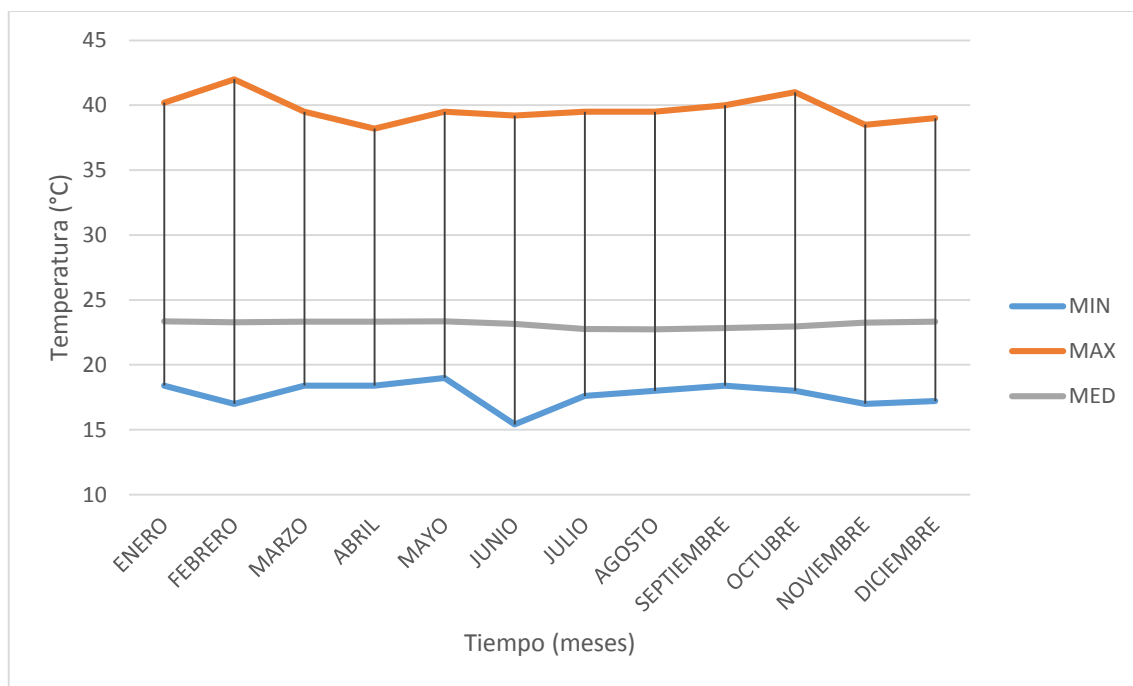
La temperatura es considerada como uno de los parámetros climáticos de mayor importancia puesto que controla el nivel de evaporación, la humedad relativa y la dirección de los vientos (los vientos cálidos tienden a ascender y los vientos fríos a descender); además, influye en los factores hidrológicos, biológicos y económicos de una región. La temperatura depende de diversos factores entre los que se tiene la inclinación de los rayos solares, la dirección y fuerza del viento, la latitud, la altura sobre el nivel del mar y la proximidad de la región a masas de agua.

En la subcuenca hidrográfica del río Aipe, la temperatura se caracteriza teniendo en cuenta los valores medios, máximos y mínimos mensuales multianuales estimados con los registros de las estaciones La Julia (1691 msnm) y Villavieja FFCC (430 msnm) para una serie de tiempo comprendida entre 1990 y 2016.



**Gráfica 4-6. Distribución temporal de la temperatura estación La Julia**

**Fuente:** Autor, 2019



**Gráfica 4-7. Distribución temporal de la temperatura estación Villavieja FFCC**

**Fuente:** Autor, 2019

De acuerdo que los registros de la estación La Julia localizada sobre los 1690 msnm y dentro de los límites de la subcuenca hidrográfica del río Aipe se tiene que las máximas temperaturas se registran en los meses de marzo y septiembre siendo 28,6° el mayor registro mientras que los menores valores se tienen en los meses de febrero y octubre. La temperatura media anual multianual es de 16°C. Por su parte la estación Villavieja FFCC localizada en cercanías de la subcuenca y sobre los 500 msnm, registra sus temperaturas máximas en los meses de febrero y octubre siendo el mayor valor 42°C y los menores registros en los meses de febrero y junio; la temperatura media anual multianual es de 23,1°C.

Por otra parte, para visualizar la relación que existe entre la temperatura del aire y el aumento o descenso de la altura sobre el nivel del mar en la subcuenca hidrográfica, es mediante el trazado de isotermas aplicando un modelo de interpolación con los registros de temperatura de estaciones adyacentes; sin embargo, y debido a que en la subcuenca y en cercanías a ella solo hay dos estaciones que registran esta variable, el trazado de dichas líneas por este método no es posible.

Por lo anterior, la variación espacial de la temperatura se analizó considerando el criterio propuesto por Cenicafe (Chavez & Jaramillo, 1998).

Chavez & Jaramillo, 1998 plantearon un método de regionalización de la temperatura partiendo de los registros de temperatura media mensual del aire de 1002 estaciones, obteniendo como resultado la siguiente relación para la región andina.

$$T_{media} = 29.02 - 0.0061H$$

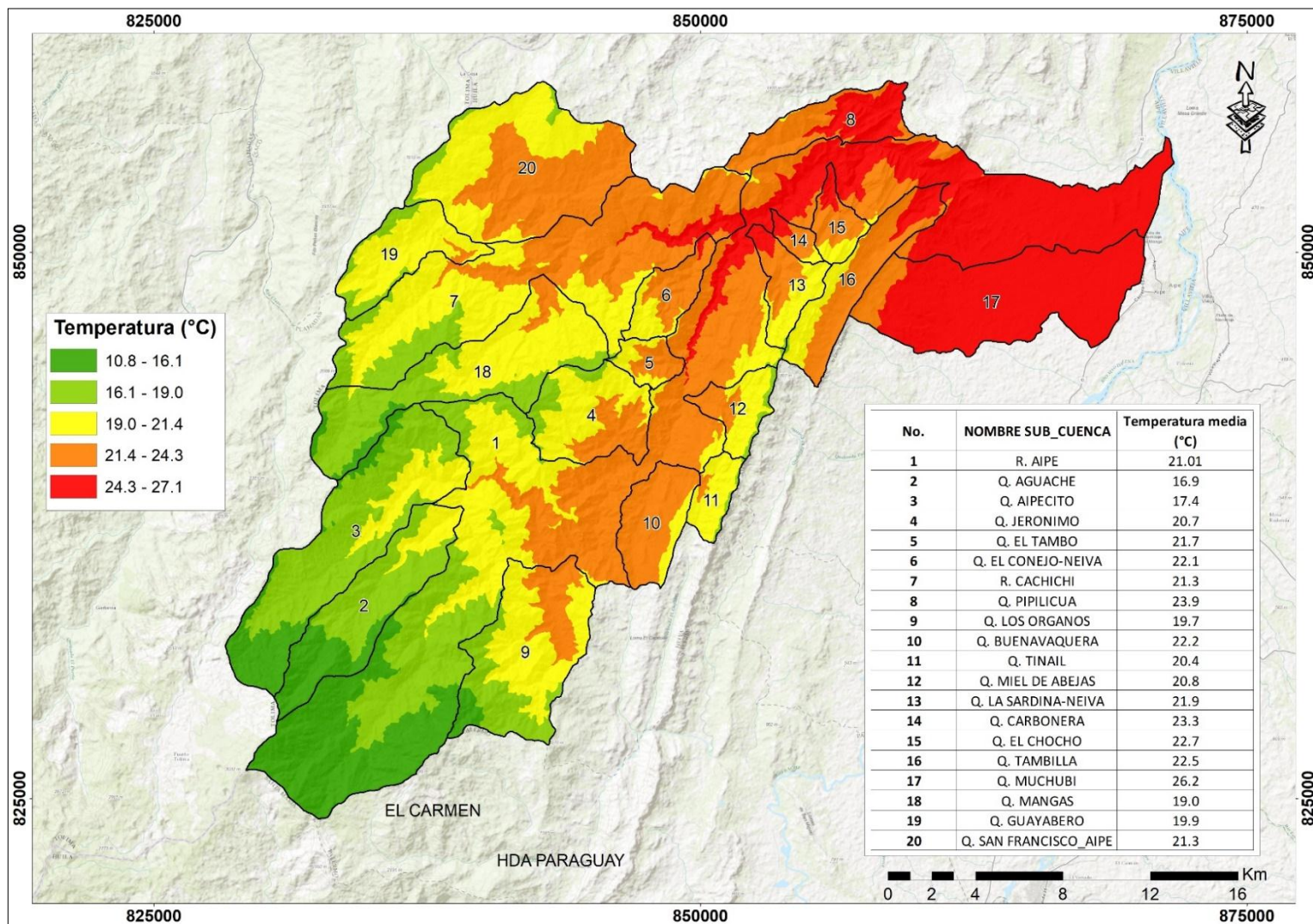
Donde:

$T_{media}$  : Temperatura media multianual en °C

H : Altura sobre el nivel del mar (m.s.n.m)

En la figura 4-3 se muestra la distribución espacial de la temperatura en la subcuenca hidrográfica del río Aipe.





**Figura 4-3. Distribución espacial de la temperatura media anual multianual (isotermas) en la subcuenca del río Aipe**

**Fuente:** Autor, 2019

### **4.3. MODELACIÓN HIDROLÓGICA**

La modelación hidrológica fue empleada para la estimación de la oferta hídrica superficial total del río Aipe, así como las de sus principales afluentes hídricas y, se realizó mediante la aplicación de la herramienta de modelación QSWAT de QGIS.

#### **4.3.1. Simulación hidrológica**

Para ejecutar la simulación hidrológica es necesario ejecutar cuatro pasos.

##### **Paso 1. Delimitación de la subcuenca:**

La forma de abordar un estudio hidrológico de una región debe ser a través de una cuenca, debido a que esta última constituye la unidad física completa donde la entrada es la precipitación y las salidas son el escurrimiento y el sedimento, incluyendo en el proceso la influencia de vegetación, suelo y topografía (Torres, Fernández, Oropeza, & Mejía, 2004).

Se puede dividir una cuenca en varias sub cuencas, lo que es muy útil en los casos en los que distintas áreas en una misma cuenca se ven afectadas por usos distintos, o cuando las propiedades del suelo son distintas. SWAT hace esta división a partir de la topografía y la red de ríos de la zona de estudio.

Para la cuenca hidrográfica del río Aipe se cuenta con un modelo digital de elevación con una resolución espacial de 12.5 x 12.5 m; insumo que fue descargado del satélite ALOS PALSAR, y para la red de drenajes se cuenta con información cartográfica suministrada por el IGAC, a escala 1:25.000. A continuación, en las siguientes figuras se observa la distribución altitudinal que se tiene para la cuenca hidrográfica del río Aipe y la red Hidrográfica.



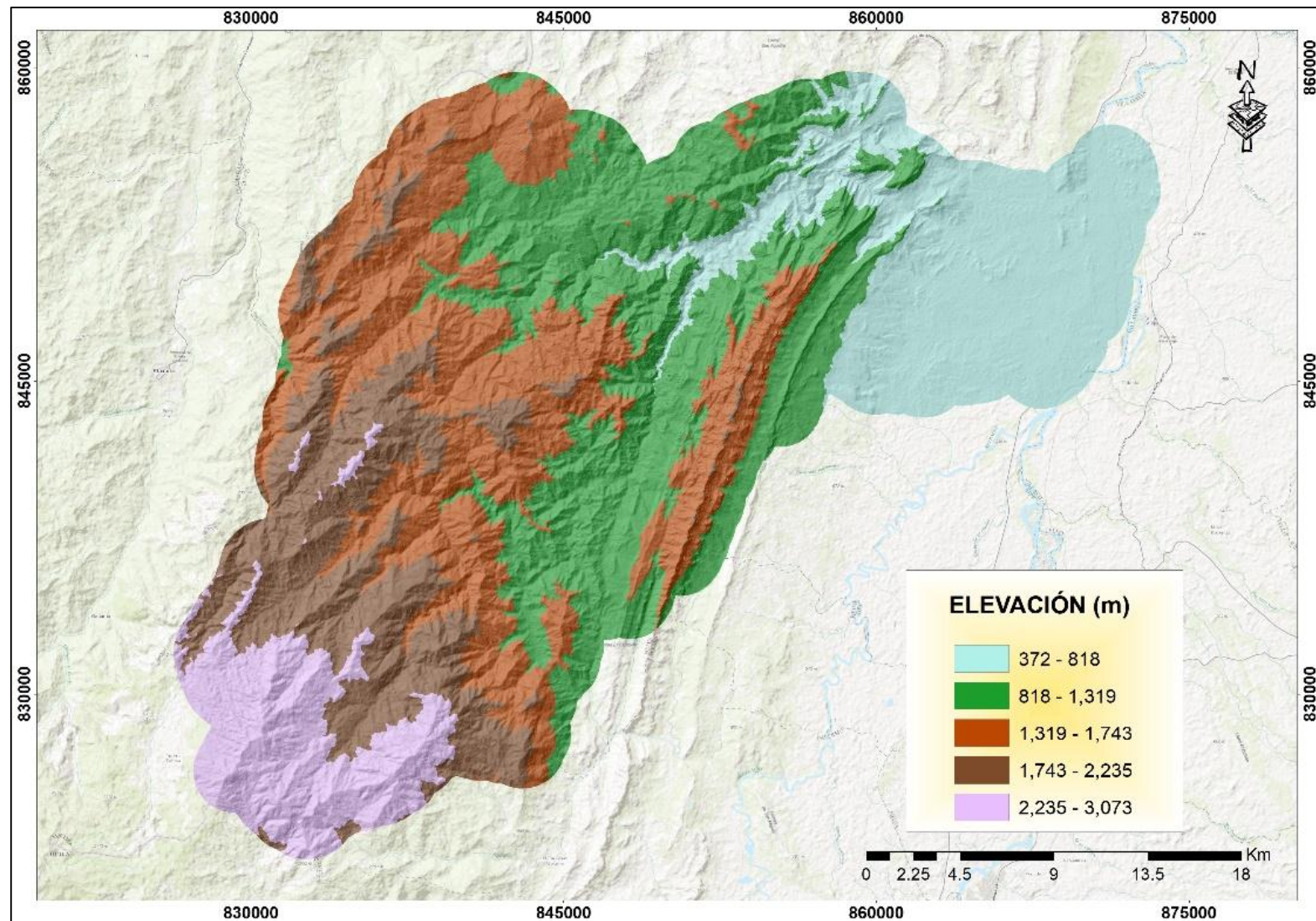
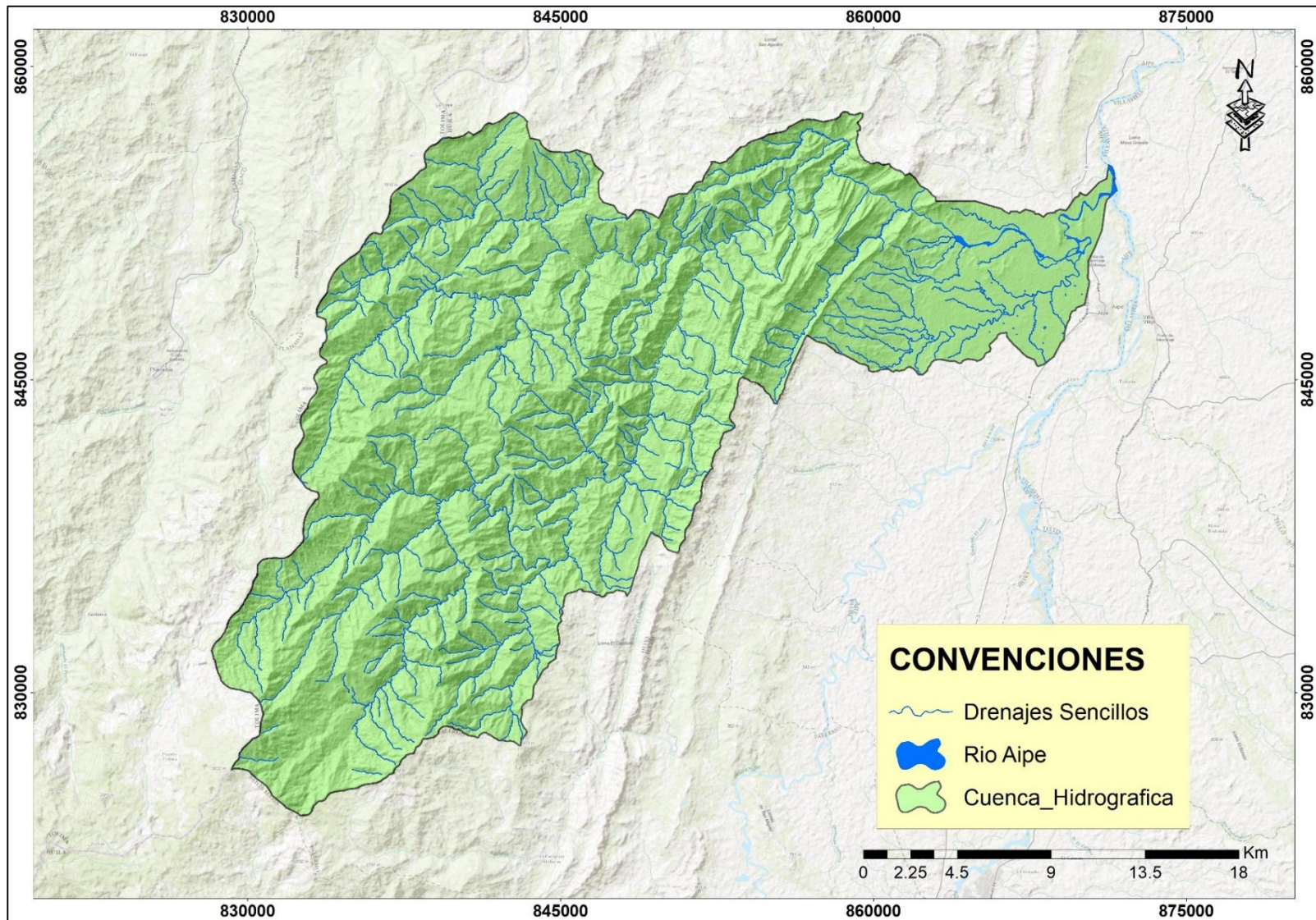


Figura 4-4. Modelo de elevación Digital del Área de estudio





**Figura 4-5. Hidrografía del área de estudio**

Fuente: IGAC, 2016

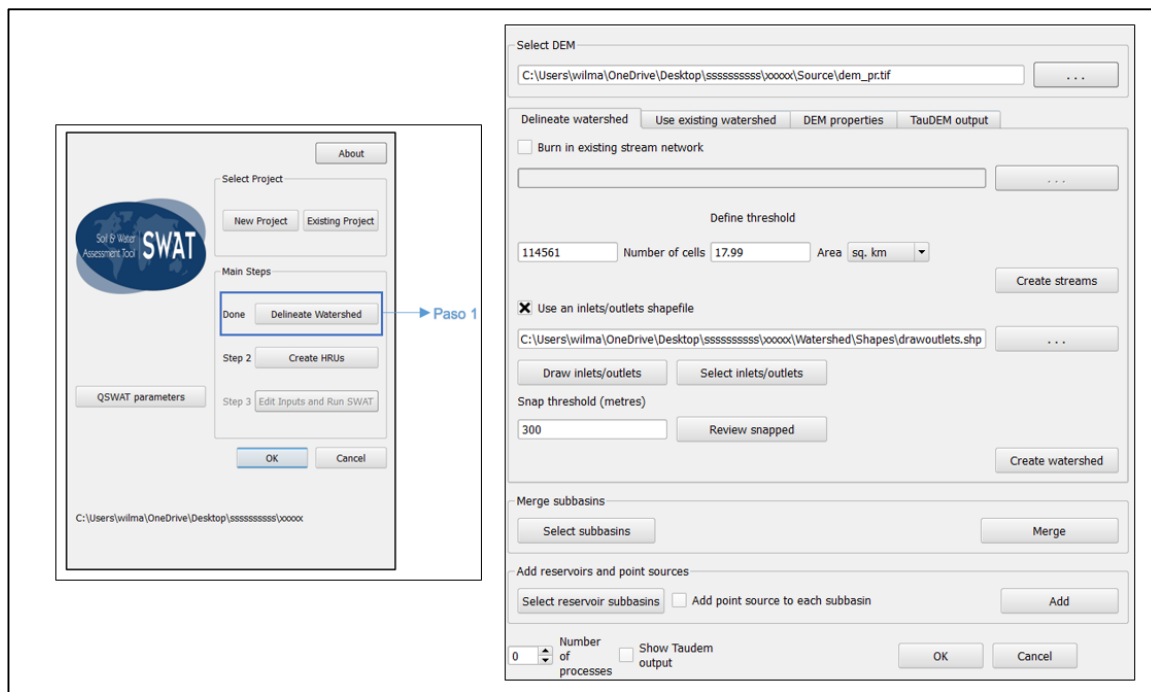
**Paso 2. Creación de las unidades Hidrológicas de respuesta:** En el modelo SWAT, las sub cuencas son divididas en unidades de respuesta hidrológica (HRUs, por sus siglas en inglés) que son unidades de la sub cuenca homogéneas en términos de su respuesta hidrológica y características geo climáticas (Cabrera). Las unidades de respuesta hidrológica no son lo mismo que una subcuenca: una HRU está conformada usualmente por áreas dispersas que mantienen propiedades comunes de especial importancia hidrológica, como son pendiente, elevación, tipo de suelo, cubierta vegetal, usos de suelo, entre otras., y en la delimitación de una subcuenca únicamente interviene la red hídrica y la topografía.

**Paso 3. Definición y edición de los datos de entrada:** Por último, antes de ejecutar la simulación, se hace una previa edición de los datos de entrada, en función de los requerimientos del estudio. Es útil cuando se quiere comprobar qué consecuencias sobre la cuenca y su funcionamiento traen ciertos cambios en diversos aspectos del entorno, como, por ejemplo, los cambios en los usos del suelo, algo que se da con cierta frecuencia y que altera en gran medida el régimen hídrico, ya que varía mucho el consumo y el aporte de agua.

**Paso 4. Simulación Con Qswat:** Una vez se finaliza el proceso de la introducción y edición de datos se procede a ejecutar SWAT, que pondrá en marcha los algoritmos matemáticos necesarios para resolver el sistema y desarrollar la modelización. Se escoge un intervalo de tiempo determinado que debe ser consecuente con la cantidad y actualidad de los datos introducidos, y SWAT elaborará resultados para todo ese período. Generalmente suelen hacerse modelizaciones de períodos de más de un año, debido a que SWAT es un modelo continuo de tiempo, lo que quiere decir que está diseñado para sucesos a largo plazo.

Para la subcuenca hidrográfica del río Aipe, se completó el paso 1, que consiste en la delineación de la cuenca y las sub cuencas usando el complemento Qswat, que es una herramienta del software SIG Qgis; en donde es necesario tener como insumos de partida el modelo digital de elevación, la red hídrica identificando cauces principales y afluentes, y señalar los puntos en esta red que suponen la entrada y salida de agua al sistema; en la figura

4-6, se puede apreciar el procedimiento ejecutado para efectuar la respectiva delimitación. Y en la figura 4-7, se observan las sub cuencas delimitadas para el área de estudio.



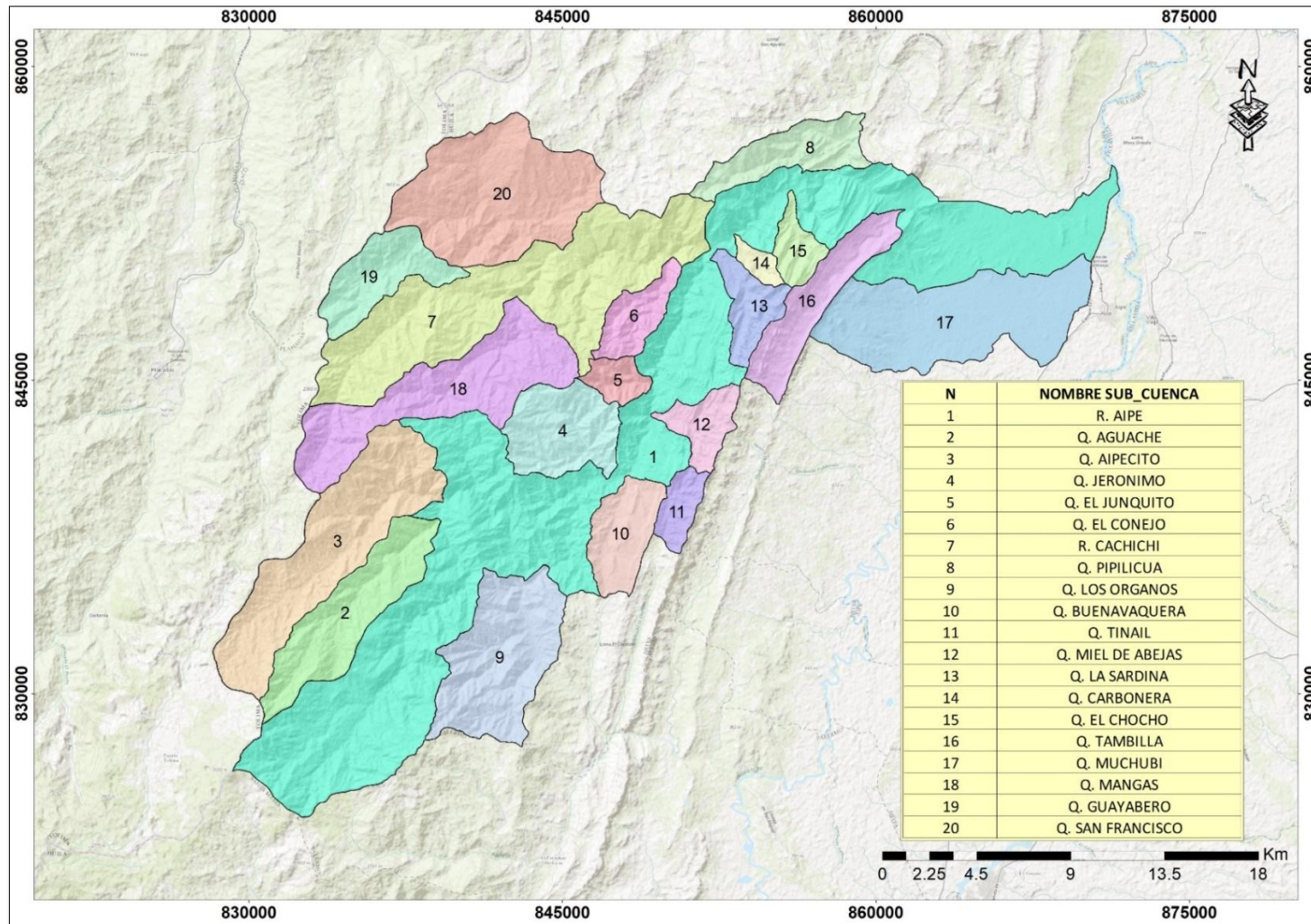
**Figura 4-6. Desarrollo del paso 1**

**Fuente:** Autor, 2019

Después de realizada la delimitación de las microcuencas de la subcuenca hidrográfica del río Aipe se procede a la creación de las HRU (Unidades hidrológicas de estudio); los insumos que fueron necesarios para completar este paso son la cobertura, tipo de suelo y pendientes presentes en el área de estudio.

**COBERTURA:** Para identificar la cobertura existente en el área de estudio, fue necesario usar información del PGOF (Plan general de ordenación forestal del año 2016 para el departamento del Huila; información que se encuentra disponible a escala 1:25.000. las categorías de cobertura tuvieron que ser reclasificadas dentro de los tipos que SWAT maneja como se muestra en la tabla 4-7 y su distribución espacial se presenta en la figura 4-8.





**Figura 4-7. Delimitación de microcuencas río Aipe**

**Fuente:** Autor, 2019

**Tabla 4-72. Cobertura identificada en el área de estudio**

<b>Codigo Swat</b>	<b>Tipo de Cobertura</b>	<b>Area (km²)</b>
<b>WATR</b>	Cuerpos de Agua	3.0
<b>RNGE</b>	Pastizales	1.8
<b>FRST</b>	Bosque mezclado	11.9
<b>RNGB</b>	Pastos secos	28.8
<b>URBN</b>	Zona Urbana	0.1
<b>FRSE</b>	Bosque de hoja perenne	18.7
<b>AGRL</b>	Tierra agrícola genérica	14.0
<b>PAST</b>	Pasto	128.1
<b>AGRC</b>	Cultivos Transitorios	5.9
<b>WETF</b>	Humedales Boscosos	50.6
<b>FRSD</b>	Áreas con Vegetación Herbácea y Arbustiva	180.5
<b>SPAS</b>	Pasto de Verano	220.2

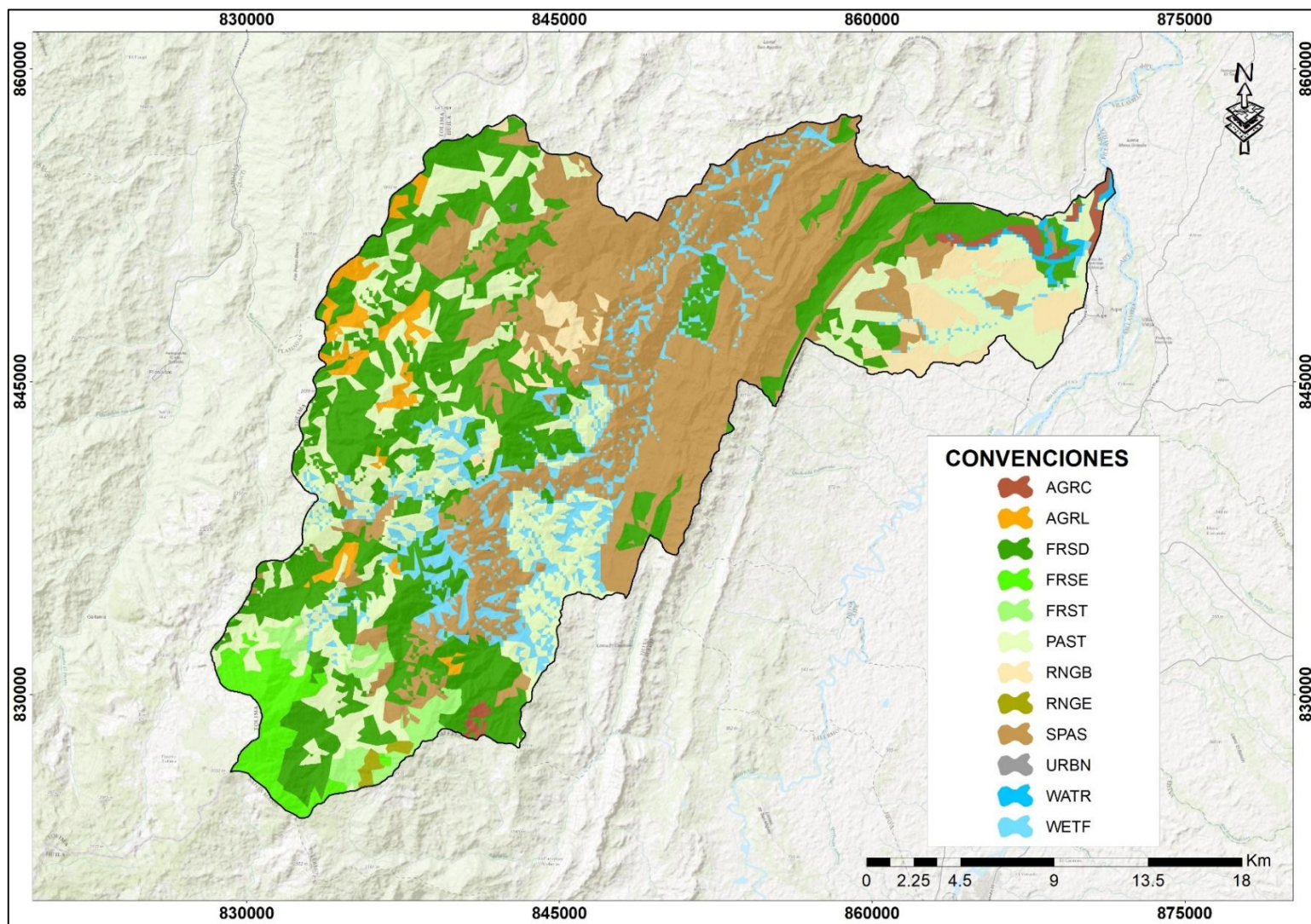
**Fuente:** CAM, 2016

**TIPOS DE SUELOS:** La información relacionada a las unidades cartográficas de suelos para la subcuenca hidrográfica del río Aipe, fue obtenida a partir del IGAC, a una escala de 1:25.000. En la tabla 4-8 y en la figura se muestra la distribución de las unidades cartográficas de suelo en el área de estudio.

**Tabla 4-83. Unidades cartográficas de suelos identificadas en la subcuenca hidrográfica del río Aipe**

<b>UNIDAD CARTOGRAFICA DE SUELO</b>	<b>AREA (km²)</b>	<b>PORCENTAJE DE LA CUENCA</b>
MKCe1	0.1	0.01
MKCf1	0.2	0.03
MLBf	40.5	6.11
MQMb	0.8	0.12
CA	0.8	0.12
MXCf2	13.6	2.05
PXAb	32.8	4.95
PXEc2	52.9	7.97
VXBa	19.1	2.88
VXCa	0.6	0.09
VXDa	0.3	0.05
VXGa	2.1	0.31
MQDf1	0.4	0.06
MQDf2	201.3	30.36
MQEf	226.9	34.23
MQHf2	0.3	0.04
MRAf3	0.3	0.04
MXEg2	70.2	10.58

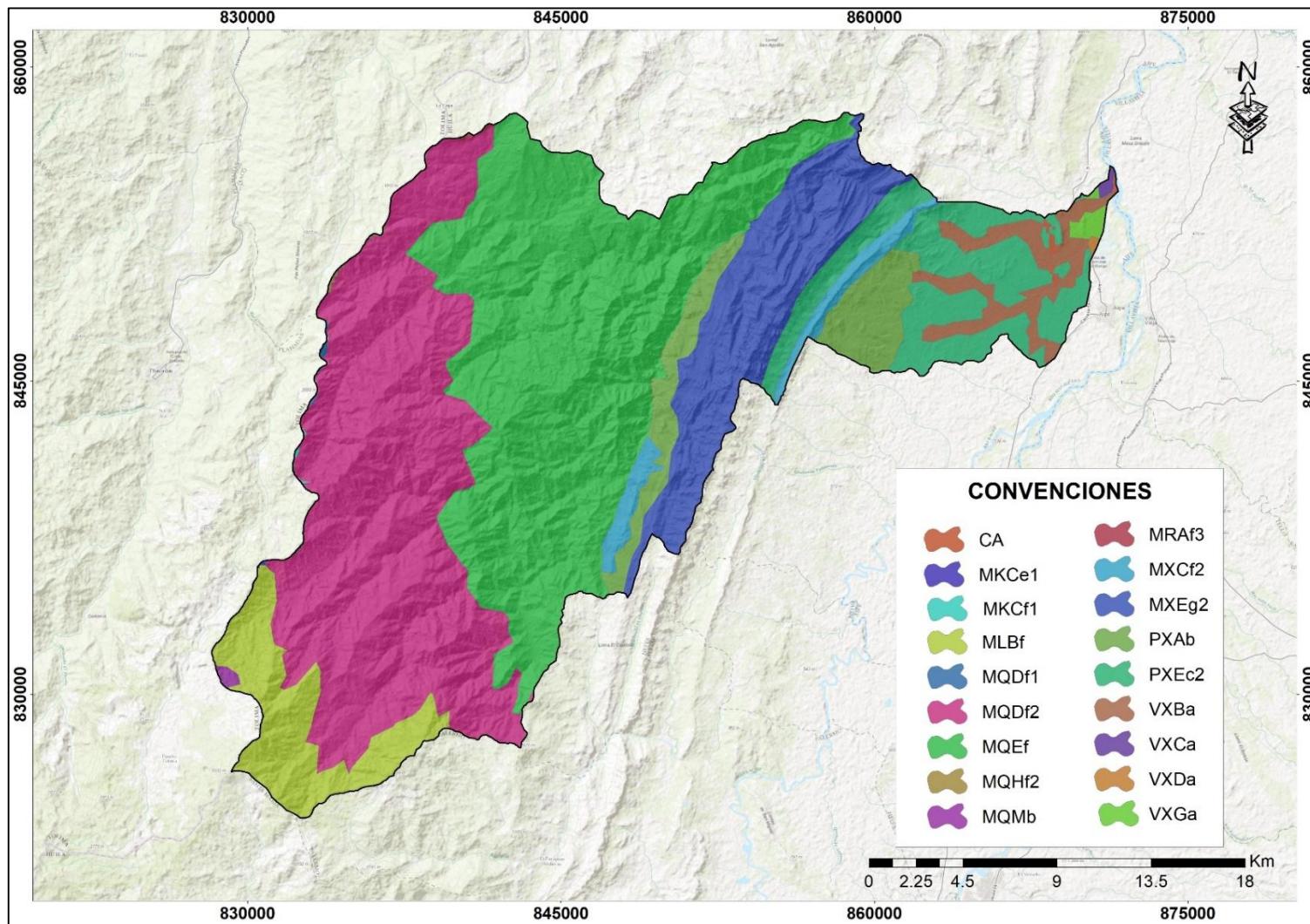
**Fuente:** CAM, 2016



**Figura 4-8. Distribución espacial de la cobertura en la subcuenca hidrográfica del río Aipe**

Fuente: Autor, 2019

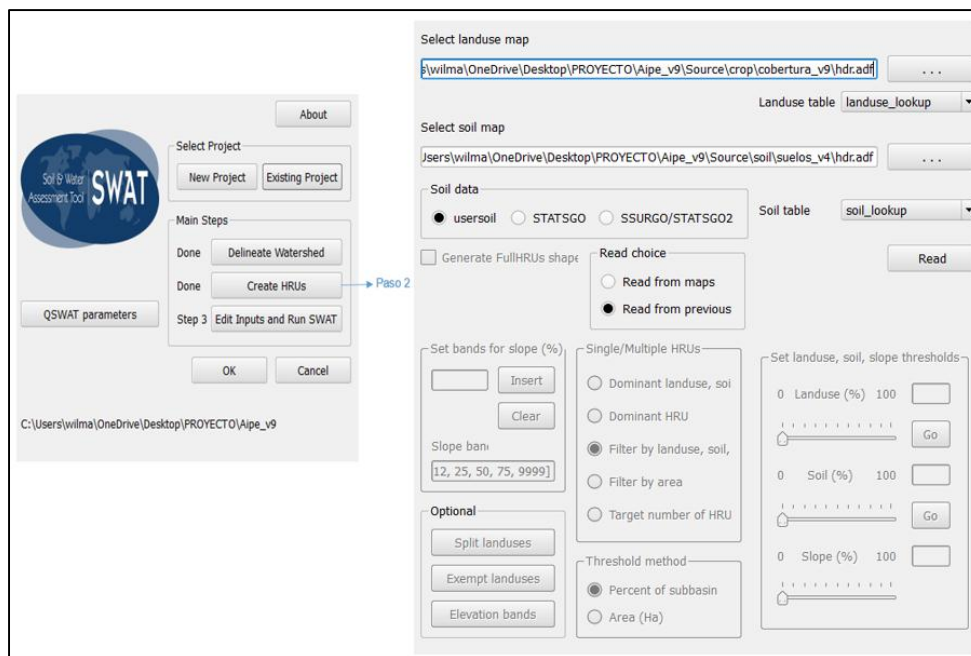




**Figura 4-9. Unidades cartográficas de suelo identificadas en la subcuenca hidrográfica del río Aipe**

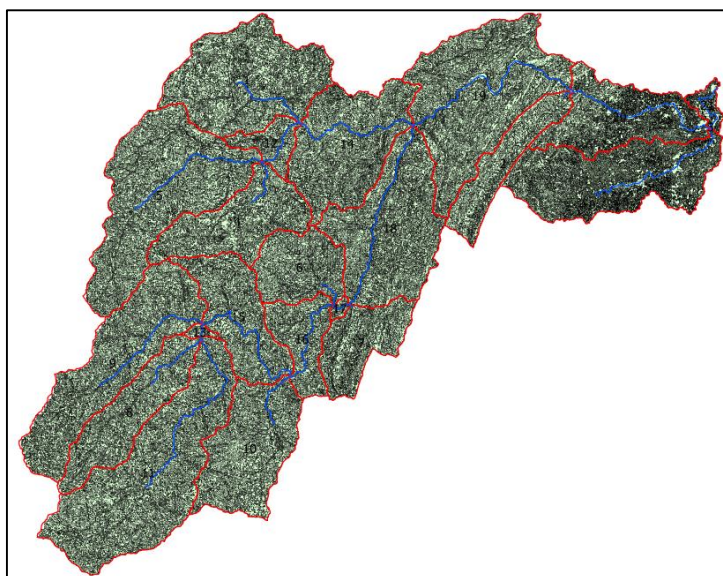
**Fuente:** Autor, 2019

Después de realizado el análisis y procesada la información relacionada con el uso y tipo de suelo, esta se cargó en QSWAT, y se procedió a la creación de las unidades hidrológicas de respuesta (Figura 4-10)



**Figura 4-10. Paso 2, Creación de unidades hidrológicas de respuesta**

**Fuente:** Autor, 2019



**Figura 4-11. Visualización de las unidades hidrológicas de respuesta**

**Fuente:** Autor, 2019



En el anexo 3, (HRU'S), se observan las características de las unidades hidrológicas de respuesta obtenidas a través de la combinación de la cobertura, el tipo de suelo y la pendiente para la cuenca hidrográfica del río Aipe.

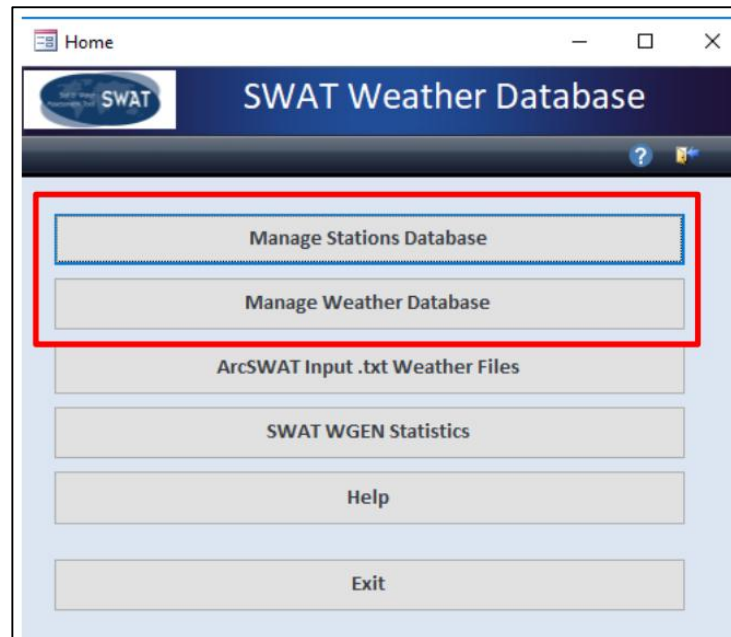
Después de definir las HRU'S, se introdujo la información climatológica predominante en el área de estudio tomando como referencia la ubicación Geográfica de cada una de las estaciones meteorológicas y los datos disponibles, información suministrada por el IDEAM; es importante aclarar que se encontraron 12 estaciones que tienen influencia directa sobre la subcuenca hidrográfica del río Aipe y que miden la variable Precipitación (mm), y de estas doce, dos estaciones miden las variables Temperatura (°C), Brillo solar (horas), velocidad del viento (m/s), y humedad relativa (fracción decimal). Debido a que el modelo hidrológico aplicado es un modelo semidistribuido se hizo necesario calcular la temperatura máxima y mínima de cada una de las microcuencas; esto a través de estaciones virtuales ubicadas en los centroides de las mismas y a partir de la construcción de una curva de temperatura contra altura sobre el nivel del mar con temperaturas de estaciones disponibles en la región, con una variación temporal similar a la registrada en la subcuenca y además con localizaciones altitudinales similares a la misma, de este modo tal que se generó una gráfica lineal para cada mes y para temperaturas máximas y mínimas (Tabla 4-9)

**Tabla 4-94. Relación de las temperaturas máxima y mínima y la elevación**

MESES	TEMPERATURA MÁXIMA	TEMPERATURA MÍNIMA
ENERO	40,15-0,0091*X	22,247-0,0056*X
FEBRERO	40,93-0,0094*X	22,562-0,0056*X
MARZO	40,699-0,0093*X	22,551-0,0054*X
ABRIL	40,223-0,0091*X	22,579-0,0053*X
MAYO	40,24-0,009*X	22,68-0,0055*X
JUNIO	40,527-0,0093*X	22,315-0,0053*X
JULIO	41,335-0,0097*X	21,756-0,0052*X
AGOSTO	42,566-0,0098*X	22,281-0,0057*X
SEPTIEMBRE	42,407-0,0094*X	22,289-0,0056*X
OCTUBRE	41,926-0,0096*X	22,505-0,0056*X
NOVIEMBRE	38,934-0,0098*X	22,384-0,0054*X
DICIEMBRE	38,641-0,0083*X	22,347-0,0054*X

**Fuente:** Autor, 2019

Por otra parte, para hacer compatible la información climatológica con el modelo hidrológico SWAT, fue necesario usar la herramienta SWAT Weather Database (figuras 4-12 y 4-13)



**Figura 4-12. Interfaz Swat Weather Database**

**Fuente:** Autor, 2019

Manage Weather Stations						
Station Code	Station Name	Latitude	Longitude	Elevation	Station Description	Other Information
13	C1	-75.500000	3.270000	1135		
22	C10	-75.500000	3.070000	1381		
23	C11	-75.560000	3.050000	2054		
24	C12	-75.490000	3.240000	1038		
25	C13	-75.530000	3.140000	1376		
26	C14	-75.450000	3.240000	1060		
27	C15	-75.500000	3.140000	1386		
28	C16	-75.470000	3.130000	1056		
29	C17	-75.450000	3.150000	919		
30	C18	-75.420000	3.190000	1052		
31	C19	-75.380000	3.260000	764		
14	C2	-75.360000	3.240000	980		
15	C3	-75.300000	3.220000	447		
16	C4	-75.510000	3.200000	1499		
17	C5	-75.550000	3.210000	1492		
18	C6	-75.470000	3.170000	1358		
19	C7	-75.430000	3.140000	1190		
20	C8	-75.560000	3.090000	1827		
21	C9	-75.570000	3.120000	1821		
4	CASA DE ZINC	-75.590000	3.290000	1737		
2	EL CARMEN	-75.560000	3.010000	2250		
6	GAITANA	-75.670000	3.090000	1476		
7	HACIENDA PARAC	-75.490000	2.980000	1300		
11	HDA PEREZ	-75.260000	3.240000	450		

**Figura 4-13. Localización de estaciones meteorológicas y virtuales**

**Fuente:** Autor, 2019

Después se importaron los datos climáticos de cada variable (PCP es precipitación, TMP es la temperatura, HMD la humedad relativa, WND la velocidad del viento y SLR brillo solar). Para esto se creó un archivo .CSV en Excel por cada variable que reúne la fecha en la que ha sido medido cada dato de cada variable, la estación en la que ha sido medido y el dato en sí.

Date	Station	PCP
1/1/90	1	0
1/2/90	1	0
1/3/90	1	0
1/4/90	1	0
1/5/90	1	0
1/6/90	1	0
1/7/90	1	0
1/8/90	1	0
1/9/90	1	0
1/10/90	1	0
1/11/90	1	0
1/12/90	1	0
1/13/90	1	0
1/14/90	1	0
1/15/90	1	0
1/16/90	1	13.5
1/17/90	1	0
1/18/90	1	0
1/19/90	1	0

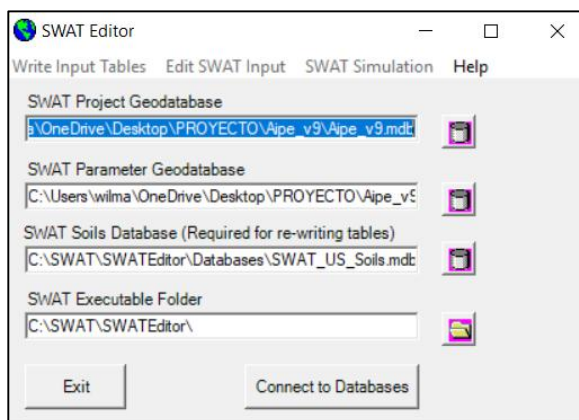
  

Date	Station	TMPmax	TMPmin
1/1/90	13	29.8	15.9
1/2/90	13	29.8	15.9
1/3/90	13	29.8	15.9
1/4/90	13	29.8	15.9
1/5/90	13	29.8	15.9
1/6/90	13	29.8	15.9
1/7/90	13	29.8	15.9
1/8/90	13	29.8	15.9
1/9/90	13	29.8	15.9
1/10/90	13	29.8	15.9
1/11/90	13	29.8	15.9
1/12/90	13	29.8	15.9
1/13/90	13	29.8	15.9
1/14/90	13	29.8	15.9
1/15/90	13	29.8	15.9
1/16/90	13	29.8	15.9
1/17/90	13	29.8	15.9
1/18/90	13	29.8	15.9
1/19/90	13	29.8	15.9

**Figura 4-14. Archivo CSV de datos climáticos**

**Fuente:** Autor, 2019

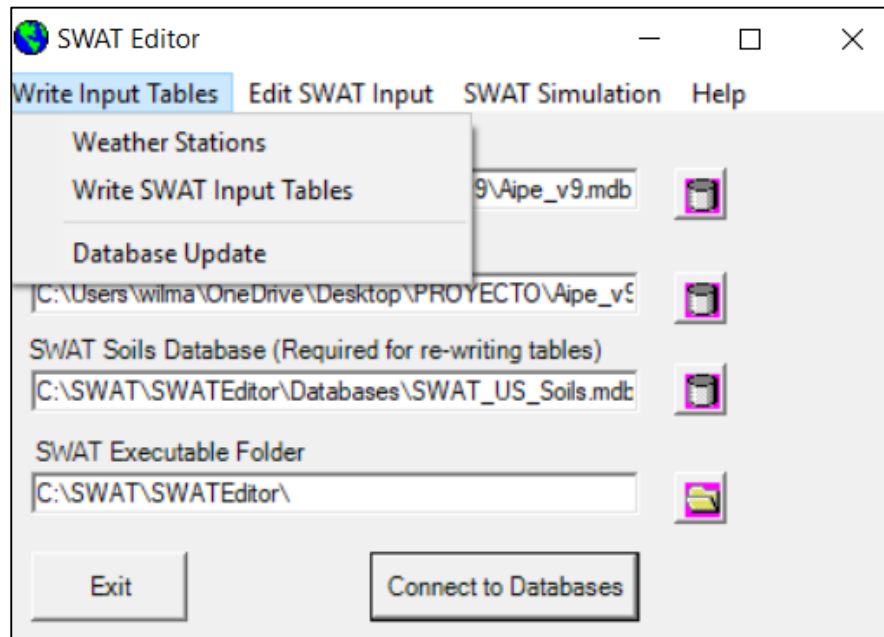
Por último, se calcularon las variables climáticas de cada estación que deben aparecer en la base de datos de SWAT, para finalmente conectar las bases de datos climáticas con el modelo hidrológico QSWAT (figura 4-15)



**Figura 4-15. Conexión de bases de datos**

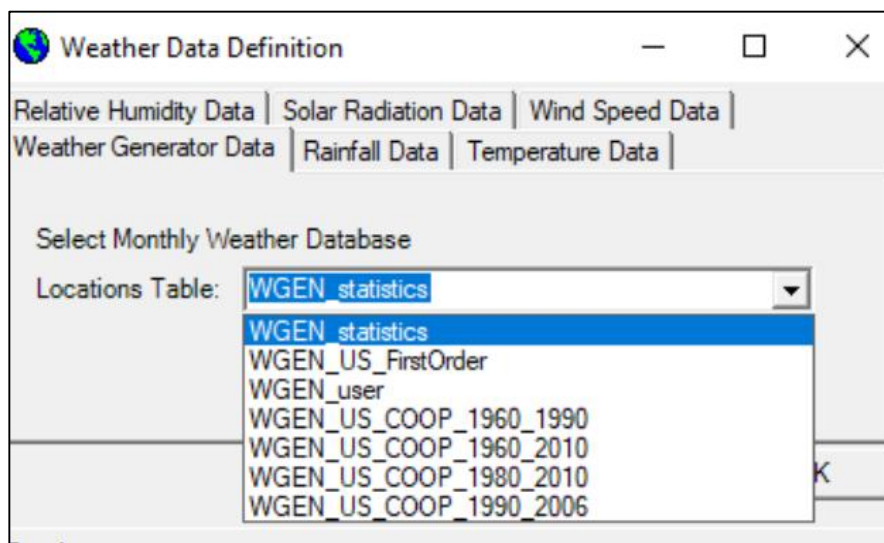
**Fuente:** Autor, 2019

Una vez se conectó el proyecto con las bases de datos se activaron varias pestañas en la misma ventana. Para introducir los datos climáticos se abrió la primera pestaña y se dio click en “Weather Stations” (figura 4-16)



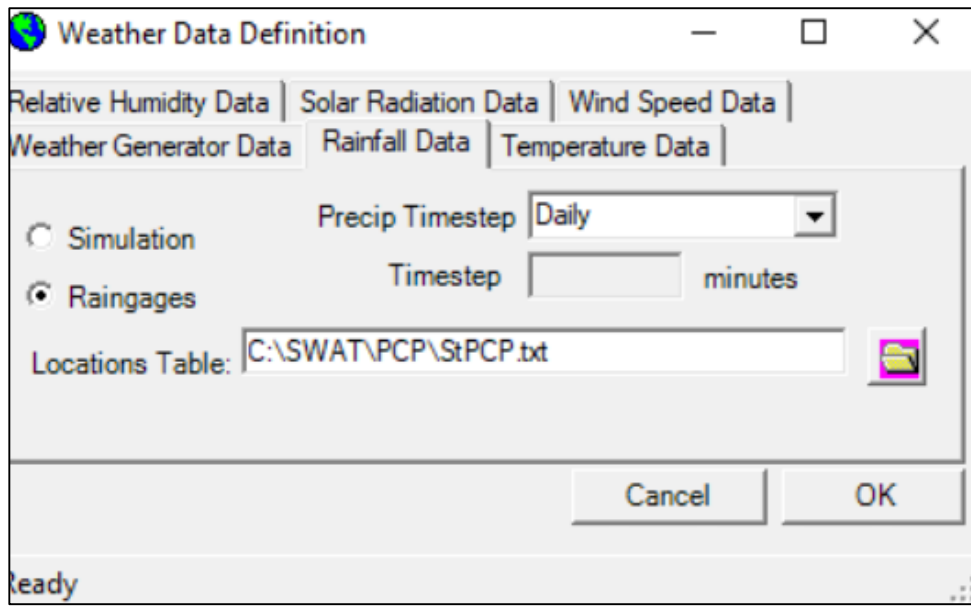
**Figura 4-16. Conexión de datos climáticos QSWAT\_1**

**Fuente:** Autor, 2019



**Figura 4-17. Conexión de datos climáticos QSWAT\_2**

**Fuente:** Autor, 2019



**Figura 4-18. Conexión de datos climáticos QSWAT\_3**

**Fuente:** Autor, 2019

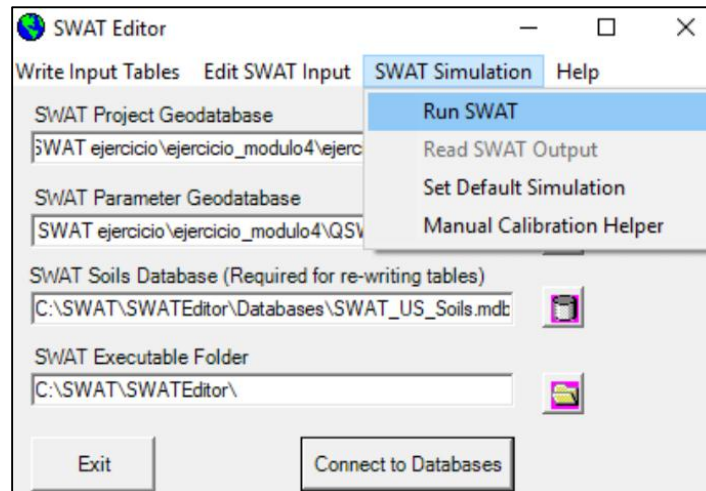
Luego de introducir los datos climáticos, todos los datos de entrada quedan incluidos. posteriormente se escribieron las tablas que utiliza SWAT para consultar los datos que necesita a la hora de ejecutar los algoritmos y llevar a cabo la simulación (figura 4-19)



**Figura 4-19. Proceso de escribir las tablas en QSWAT**

**Fuente:** Autor, 2019

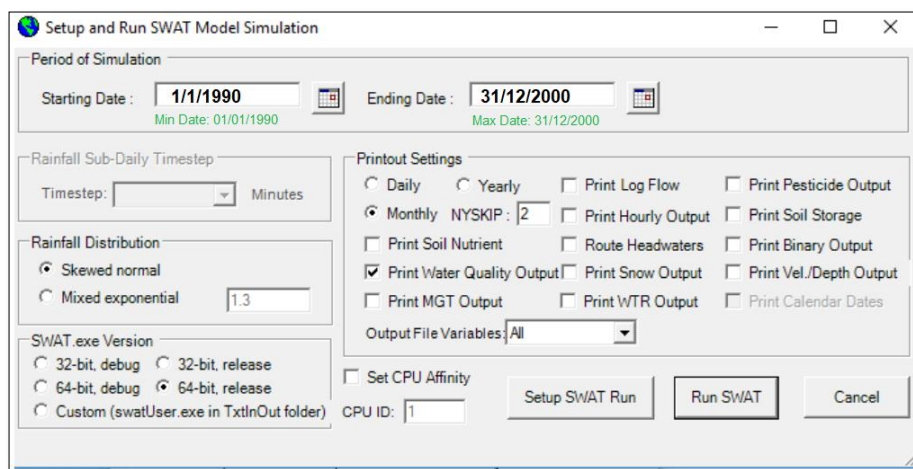
Después de haber escrito las tablas en QSWAT, se procedió a ejecutar el modelo (figura 4-20)



**Figura 4-20. Inicio de corrida del modelo hidrológico**

Fuente: Autor, 2019

El periodo temporal a simular, donde el primer día del mismo fue el primer día del que se tienen datos climáticos (01/01/1990), y el último día es el último del que se tienen datos climáticos (31/12/2000). (Periodo de Calibración)



**Figura 4-21. Corrida del modelo hidrológico**

Fuente: Autor, 2019

#### 4.3.2. Calibración del modelo

La calibración es el proceso de estimación de los parámetros mediante la comparación de las predicciones del modelo para un conjunto determinado de condiciones con los datos observados para las mismas condiciones (Ma et al, 2000; Moriasi et al, 2007); es un proceso subjetivo que consiste en variar sistémicamente parámetros hasta que se tenga un buen ajuste entre la serie observada y la serie simulada de caudales, además de la correspondencia entre los caudales simulados y los reales mediante el análisis de la curva de duración de caudales. Adicional para evaluar el desempeño del modelo de manera cuantitativa se calculan los siguientes criterios:

- El error porcentual del balance (BE) cuyo óptimo es de 0%

$$BE(\%) = \frac{|Q_{sim} - Q_{obs}|}{Q_{obs}} \cdot 100$$

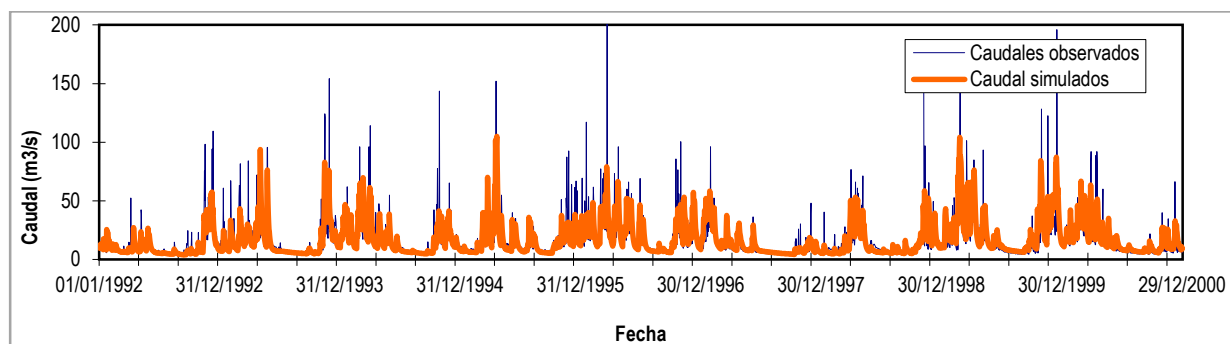
- El coeficiente de eficiencia de Nash para la raíz cuadrada de los caudales (E<sup>2</sup>), cuyo óptimo es el 100%

$$E2(\%) = 1 - \left( \frac{\sum_{t=1}^T (\sqrt{Q_{t\ sim}} - \sqrt{Q_{t\ obs}})^2}{\sum_{t=1}^T (\sqrt{Q_{t\ obs}} - \sqrt{Q_{obs}})^2} \right) \cdot 100$$

Este último criterio es considerado por Gassman et al., 2007 como uno de los estadísticos que más ampliamente se han utilizado en hidrología para la calibración y validación de modelos.

La estación hidrométrica seleccionada para la calibración es la estación Puente Carretera con código 21137030, localizada sobre el cauce del río Aipe y la serie de calibración comprende los años de 1990 a 2000; sin embargo, es importante aclarar que en la estimación de los criterios

de desempeño del modelo se excluyen los años 1990 y 1991 ya que estos son utilizados en la preparación de las variables de estado usadas por SWAT durante la simulación hidrológica.



**Gráfica 4-8. Distribución temporal de los caudales simulados y observados: calibración**

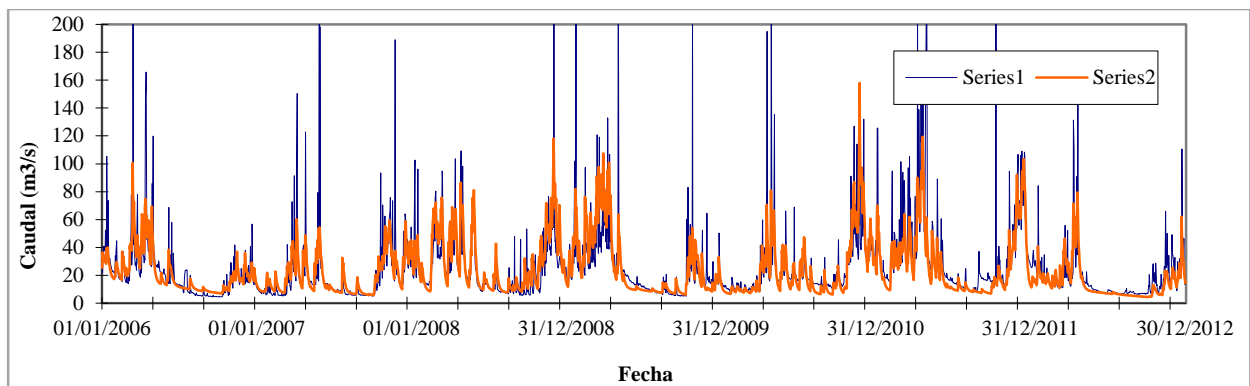
**Fuente:** Autor, 2019

De la gráfica 4-8 se tiene que la variación interanual de la serie de caudales observada y simulada presenta un ajuste aceptable. Por otra parte, el error medio del balance (BE) es de 2,93%, y el coeficiente de eficiencia de Nash para la raíz cuadrada de los caudales (E2) es de 61,72 que de acuerdo con lo establecido Moriasi et.al., 2007 se interpreta como satisfactorio.

Calibrado el modelo se procede a validar temporalmente su ajuste, evaluando una serie de tiempo diferente a la considerada en el proceso de calibración, pero sin modificar los parámetros del modelo ya calibrados.

De esta manera y considerando las series de precipitación y caudal para 7 años comprendidos entre 2006 y 2012 de las mismas estaciones utilizadas en la calibración se ejecuta el modelo. A continuación, se presentan las gráficas de variación interanual de las series simuladas y observadas.





**Gráfica 4-9. Distribución temporal de los caudales simulados y observados: Validación**

**Fuente:** Autor, 2019

De los resultados de la validación se obtiene de acuerdo con la gráfica 4-9 un ajuste aceptable entre el caudal simulado y el observado. El error medio del balance (BE) es de 5,84%, y el coeficiente de eficiencia de Nash para la raíz cuadrada de los caudales (E2) es de 64,66 que al igual que en la calibración se considera un ajuste satisfactorio.

## **4.4. OFERTA HÍDRICA**

### **4.4.1. Oferta hídrica superficial total**

La estimación de la oferta hídrica total para condiciones hidrológicas promedio y año típico seco se realizó según la metodología expuesta por el IDEAM, 2010.

De esta manera, con las series de caudales medios diarios generadas mediante la aplicación del modelo hidrológico SWAT para el río Aipe y sus microcuencas se estima la oferta hídrica total para cada condición hidrológica. Esta se consigna en las tablas 4-10 y 4-11.

**Tabla 4-10. Oferta hídrica superficial total año hidrológico normal (m³/s)**

NOMBRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
RIO AIPE	20.215	24.31	30.179	34.87	23.859	13.445	10.25	7.924	8.031	16.701	31.457	28.635	20.823
Q. AGUACHE	1.029	1.21	1.45	1.446	0.955	0.55	0.442	0.33	0.358	0.789	1.262	1.209	0.919
Q. AIPECITO	1.779	2.106	2.536	2.585	1.685	0.989	0.773	0.582	0.625	1.374	2.255	2.132	1.618
Q. JERONIMO	0.614	0.806	1.025	1.213	0.724	0.432	0.244	0.188	0.207	0.565	1.089	0.953	0.672
Q. EL TAMBO	0.151	0.188	0.239	0.278	0.189	0.104	0.072	0.055	0.057	0.128	0.244	0.214	0.16
Q. EL CONEJO-NEIVA	0.283	0.351	0.434	0.475	0.357	0.169	0.134	0.097	0.101	0.224	0.436	0.385	0.287
R. CACHICHI	2.305	2.863	3.551	3.878	2.88	1.39	1.104	0.804	0.846	1.874	3.588	3.144	2.352
Q. PIPILICUA	0.37	0.42	0.511	0.637	0.468	0.233	0.178	0.133	0.137	0.309	0.631	0.608	0.386
Q. LOS ORGANOS	1.233	1.497	1.947	2.176	1.258	0.775	0.48	0.373	0.371	0.766	1.624	1.549	1.171
Q. BUENAVAQUERA	0.414	0.533	0.685	0.81	0.487	0.296	0.172	0.134	0.142	0.355	0.703	0.624	0.446
Q. TINAIL	0.175	0.229	0.291	0.345	0.206	0.124	0.071	0.054	0.059	0.159	0.306	0.27	0.191
Q. MIEL DE ABEJAS	0.235	0.308	0.392	0.464	0.278	0.168	0.096	0.074	0.08	0.211	0.409	0.362	0.256
Q. LA SARDINA-NEIVA	0.261	0.323	0.397	0.438	0.333	0.161	0.128	0.094	0.095	0.202	0.392	0.354	0.265
Q. CARBONERA	0.074	0.092	0.113	0.125	0.095	0.046	0.037	0.027	0.027	0.056	0.11	0.101	0.075
Q. EL CHOCHO	0.146	0.159	0.194	0.254	0.183	0.091	0.068	0.05	0.054	0.131	0.27	0.262	0.155
Q. TAMBILLA	0.413	0.424	0.519	0.728	0.506	0.254	0.179	0.135	0.149	0.401	0.835	0.814	0.447
Q. MUCHUBI	0.731	0.668	0.779	1.182	0.813	0.394	0.255	0.191	0.206	0.627	1.442	1.541	0.736
Q. MANGAS	2.829	3.586	4.424	4.717	3.647	2.021	1.453	0.875	1.024	2.484	3.714	3.69	2.872
Q. GUAYABERO	0.56	0.695	0.864	0.94	0.7	0.327	0.258	0.185	0.202	0.469	0.893	0.768	0.572
Q. SAN FRANCISCO_AIPE	1.619	2.01	2.496	2.724	2.028	0.946	0.746	0.536	0.577	1.336	2.57	2.225	1.651

**Fuente:** Autor, 2019

**Tabla 4-11. Oferta hídrica superficial total año hidrológico seco (m³/s)**

NOMBRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
RIO AIPE	5.796	6.348	7.607	12.316	6.23	6.185	5.201	4.246	3.83	4.39	6.875	4.593	3.83
Q. AGUACHE	0.251	0.347	0.22	0.196	0.171	0.149	0.136	0.117	0.101	0.118	0.302	0.214	0.101
Q. AIPECITO	0.462	0.682	0.45	0.396	0.388	0.33	0.306	0.263	0.229	0.284	0.578	0.386	0.229
Q. JERONIMO	0.053	0.045	0.038	0.049	0.041	0.065	0.049	0.042	0.043	0.043	0.048	0.063	0.038
Q. EL TAMBO	0.029	0.028	0.027	0.066	0.032	0.037	0.032	0.023	0.023	0.024	0.051	0.04	0.023
Q. EL CONEJO-NEIVA	0.07	0.076	0.073	0.112	0.08	0.072	0.05	0.044	0.042	0.042	0.063	0.045	0.042
R. CACHICHI	0.627	0.677	0.612	0.948	0.663	0.592	0.445	0.405	0.356	0.366	0.572	0.38	0.356
Q. PIPILICUA	0.1	0.08	0.144	0.162	0.134	0.107	0.084	0.075	0.065	0.058	0.079	0.057	0.057
Q. LOS ORGANOS	0.343	0.365	0.345	0.421	0.388	0.257	0.209	0.184	0.16	0.286	0.54	0.241	0.16
Q. BUENAVAQUERA	0.047	0.04	0.034	0.06	0.04	0.063	0.043	0.036	0.039	0.044	0.05	0.054	0.034
Q. TINAIL	0.016	0.013	0.011	0.014	0.012	0.017	0.014	0.012	0.012	0.012	0.013	0.018	0.011
Q. MIEL DE ABEJAS	0.022	0.018	0.016	0.018	0.016	0.022	0.019	0.016	0.016	0.016	0.018	0.023	0.016
Q. LA SARDINA-NEIVA	0.066	0.069	0.071	0.108	0.076	0.071	0.049	0.046	0.042	0.041	0.056	0.042	0.041
Q. CARBONERA	0.019	0.019	0.02	0.031	0.022	0.02	0.014	0.013	0.012	0.011	0.015	0.012	0.011
Q. EL CHOCHO	0.039	0.025	0.051	0.063	0.053	0.041	0.032	0.028	0.025	0.022	0.032	0.021	0.021
Q. TAMBILLA	0.11	0.058	0.124	0.161	0.125	0.108	0.083	0.072	0.063	0.057	0.089	0.055	0.055
Q. MUCHUBI	0.127	0.068	0.136	0.211	0.18	0.138	0.108	0.094	0.082	0.083	0.095	0.076	0.068
Q. MANGAS	0.434	0.916	0.548	1.556	0.518	0.448	0.329	0.26	0.244	0.607	1.156	0.683	0.244
Q. GUAYABERO	0.137	0.157	0.141	0.216	0.157	0.133	0.095	0.08	0.079	0.086	0.141	0.09	0.079
Q. SAN FRANCISCO_AIPE	0.394	0.447	0.408	0.625	0.454	0.387	0.275	0.233	0.227	0.241	0.393	0.257	0.227

**Fuente:** Autor, 2019

Por otra teniendo en cuenta que la resolución 865 del 2004 establece que “*Cuando existe información histórica confiable de los caudales con series extensas, el caudal medio anual del río es la oferta hídrica de esa cuenca*”, la oferta hídrica superficial total para un año hidrológico promedio o normal es el caudal medio anual multianual así se fija la oferta hídrica superficial total para un año hidrológico normal en cada una de las 20 unidades delimitadas como de análisis y para un año hidrológico seco se considera el mínimo de los caudales mensuales.

#### 4.4.2. Oferta hídrica superficial disponible

La oferta hídrica superficial disponible es el resultado de la diferencia entre la oferta hídrica superficial total y el caudal ambiental. A continuación se estima el caudal ambiental para las unidades de estudio con base en la tercera metodología propuesta por (MINAMBIENTE, 2014) que consiste en la comparación entre el caudal 7Q10 y el caudal Q95. En las siguientes tablas se muestran los valores estimados para cada unidad de estudio.

**Tabla 4-12. Caudales ambientales 7Q10 y Q95 (m³/s)**

NOMBRE	7Q10	Q 95											
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
RIO AIPE	4.343	5.961	5.806	7.423	8.37	6.979	6.108	5.289	4.412	4.029	4.844	7.556	6.119
Q. AGUACHE	0.173	0.247	0.287	0.264	0.29	0.237	0.224	0.199	0.163	0.173	0.175	0.28	0.251
Q. AIPECITO	0.31	0.432	0.509	0.474	0.545	0.425	0.394	0.351	0.288	0.292	0.326	0.517	0.455
Q. JERONIMO	0.061	0.06	0.053	0.052	0.064	0.067	0.068	0.057	0.05	0.046	0.049	0.072	0.067
Q. EL TAMBO	0.025	0.037	0.034	0.039	0.045	0.042	0.037	0.031	0.026	0.024	0.029	0.043	0.039
Q. EL CONEJO-NEIVA	0.042	0.067	0.066	0.075	0.09	0.077	0.064	0.052	0.046	0.041	0.047	0.091	0.06
R. CACHICHI	0.359	0.565	0.567	0.654	0.749	0.641	0.54	0.459	0.394	0.354	0.406	0.792	0.507
Q. PIPILICUA	0.067	0.094	0.078	0.114	0.14	0.121	0.101	0.086	0.075	0.066	0.069	0.118	0.107
Q. LOS ORGANOS	0.191	0.263	0.285	0.333	0.381	0.329	0.272	0.223	0.189	0.171	0.22	0.392	0.287
Q. BUENAVAQUERA	0.05	0.062	0.058	0.06	0.064	0.073	0.07	0.059	0.051	0.045	0.044	0.06	0.067
Q. TINAIL	0.018	0.017	0.015	0.015	0.017	0.019	0.019	0.016	0.014	0.013	0.014	0.021	0.019
Q. MIEL DE ABEJAS	0.024	0.023	0.02	0.019	0.021	0.025	0.025	0.021	0.019	0.017	0.019	0.029	0.025
Q. LA SARDINA-NEIVA	0.042	0.064	0.065	0.074	0.089	0.075	0.063	0.053	0.046	0.041	0.045	0.086	0.061
Q. CARBONERA	0.012	0.018	0.018	0.021	0.025	0.022	0.018	0.015	0.013	0.012	0.012	0.024	0.018
Q. EL CHOCHO	0.026	0.036	0.03	0.043	0.053	0.046	0.039	0.033	0.029	0.025	0.027	0.043	0.042
Q. TAMBILLA	0.069	0.1	0.084	0.112	0.136	0.119	0.101	0.085	0.075	0.064	0.067	0.099	0.11
Q. MUCHUBI	0.095	0.14	0.128	0.132	0.19	0.171	0.139	0.123	0.106	0.09	0.086	0.115	0.159
Q. MANGAS	0.246	0.352	0.342	0.406	0.471	0.409	0.359	0.31	0.256	0.236	0.287	0.469	0.379
Q. GUAYABERO	0.078	0.127	0.121	0.139	0.166	0.144	0.119	0.099	0.084	0.076	0.094	0.191	0.112
Q. SAN FRANCISCO_AIPE	0.228	0.366	0.354	0.405	0.485	0.418	0.348	0.287	0.245	0.221	0.263	0.528	0.324

**Fuente:** Autor, 2019

**Tabla 4-13. Propuesta de caudal ambientales (m³/s)**

NOMBRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROMEDIO
RIO AIPE	5.961	5.806	7.423	8.37	6.979	6.108	5.289	4.412	4.343	4.844	7.556	6.119	6.101
Q. AGUACHE	0.247	0.287	0.264	0.29	0.237	0.224	0.199	0.173	0.173	0.175	0.28	0.251	0.233
Q. AIPECITO	0.432	0.509	0.474	0.545	0.425	0.394	0.351	0.31	0.31	0.326	0.517	0.455	0.421
Q. JERONIMO	0.061	0.061	0.061	0.064	0.067	0.068	0.061	0.061	0.061	0.061	0.072	0.067	0.064
Q. EL TAMBO	0.037	0.034	0.039	0.045	0.042	0.037	0.031	0.026	0.025	0.029	0.043	0.039	0.035
Q. EL CONEJO-NEIVA	0.067	0.066	0.075	0.09	0.077	0.064	0.052	0.046	0.042	0.047	0.091	0.06	0.065
R. CACHICHI	0.565	0.567	0.654	0.749	0.641	0.54	0.459	0.394	0.359	0.406	0.792	0.507	0.553
Q. PIPILICUA	0.094	0.078	0.114	0.14	0.121	0.101	0.086	0.075	0.067	0.069	0.118	0.107	0.097
Q. LOS ORGANOS	0.263	0.285	0.333	0.381	0.329	0.272	0.223	0.191	0.191	0.22	0.392	0.287	0.281
Q. BUENAVAQUERA	0.062	0.058	0.06	0.064	0.073	0.07	0.059	0.051	0.05	0.05	0.06	0.067	0.06
Q. TINAIL	0.018	0.018	0.018	0.018	0.019	0.019	0.018	0.018	0.018	0.018	0.021	0.019	0.018
Q. MIEL DE ABEJAS	0.024	0.024	0.024	0.024	0.025	0.025	0.024	0.024	0.024	0.024	0.029	0.025	0.025
Q. LA SARDINA-NEIVA	0.064	0.065	0.074	0.089	0.075	0.063	0.053	0.046	0.042	0.045	0.086	0.061	0.063
Q. CARBONERA	0.018	0.018	0.021	0.025	0.022	0.018	0.015	0.013	0.012	0.012	0.024	0.018	0.018
Q. EL CHOCHO	0.036	0.03	0.043	0.053	0.046	0.039	0.033	0.029	0.026	0.027	0.043	0.042	0.037
Q. TAMBILLA	0.1	0.084	0.112	0.136	0.119	0.101	0.085	0.075	0.069	0.069	0.099	0.11	0.097
Q. MUCHUBI	0.14	0.128	0.132	0.19	0.171	0.139	0.123	0.106	0.095	0.095	0.115	0.159	0.133
Q. MANGAS	0.352	0.342	0.406	0.471	0.409	0.359	0.31	0.256	0.246	0.287	0.469	0.379	0.357
Q. GUAYABERO	0.127	0.121	0.139	0.166	0.144	0.119	0.099	0.084	0.078	0.094	0.191	0.112	0.123
Q. SAN FRANCISCO_AIPE	0.366	0.354	0.405	0.485	0.418	0.348	0.287	0.245	0.228	0.263	0.528	0.324	0.354

**Fuente:** Autor, 2019

De igual manera, se estimaron los caudales ambientales para un año hidrológico seco a partir de lo establecido en por el IDEAM, 2015, según el cual se obtiene “*de una proporción entre el caudal ambiental año medio y el caudal medio estimado.*” Así, la fracción establecida como el caudal ambiental a partir del caudal medio para año hidrológico normal (tabla 4-13), será la misma fracción aplicada para la estimación del caudal ambiental para un año hidrológico seco

**Tabla 4-14. Propuesta de caudales ambientales en términos de fracción**

NOMBRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROMEDIO
RIO AIPE	0.29	0.24	0.25	0.24	0.29	0.45	0.52	0.56	0.54	0.29	0.24	0.21	0.34
Q. AGUACHE	0.24	0.24	0.18	0.2	0.25	0.41	0.45	0.52	0.48	0.22	0.22	0.21	0.3
Q. AIPECITO	0.24	0.24	0.19	0.21	0.25	0.4	0.45	0.53	0.5	0.24	0.23	0.21	0.31
Q. JERONIMO	0.1	0.08	0.06	0.05	0.09	0.16	0.25	0.33	0.3	0.11	0.07	0.07	0.14
Q. EL TAMBO	0.24	0.18	0.16	0.16	0.22	0.35	0.44	0.47	0.44	0.22	0.18	0.18	0.27
Q. EL CONEJO-NEIVA	0.24	0.19	0.17	0.19	0.21	0.38	0.39	0.47	0.42	0.21	0.21	0.16	0.27
R. CACHICHI	0.24	0.2	0.18	0.19	0.22	0.39	0.42	0.49	0.42	0.22	0.22	0.16	0.28
Q. PIPILICUA	0.25	0.19	0.22	0.22	0.26	0.43	0.48	0.56	0.49	0.22	0.19	0.18	0.31
Q. LOS ORGANOS	0.21	0.19	0.17	0.17	0.26	0.35	0.47	0.51	0.52	0.29	0.24	0.19	0.3
Q. BUENAVAQUERA	0.15	0.11	0.09	0.08	0.15	0.24	0.34	0.38	0.35	0.14	0.08	0.11	0.18
Q. TINAIL	0.1	0.08	0.06	0.05	0.09	0.15	0.25	0.33	0.3	0.11	0.07	0.07	0.14
Q. MIEL DE ABEJAS	0.1	0.08	0.06	0.05	0.09	0.15	0.25	0.33	0.3	0.11	0.07	0.07	0.14
Q. LA SARDINA-NEIVA	0.24	0.2	0.19	0.2	0.23	0.39	0.41	0.49	0.44	0.22	0.22	0.17	0.28

NOMBRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROMEDIO
Q. CARBONERA	0.25	0.2	0.19	0.2	0.23	0.39	0.42	0.5	0.45	0.22	0.22	0.18	0.29
Q. EL CHOCHO	0.24	0.19	0.22	0.21	0.25	0.42	0.48	0.57	0.48	0.2	0.16	0.16	0.3
Q. TAMBILLA	0.24	0.2	0.22	0.19	0.23	0.4	0.48	0.56	0.46	0.17	0.12	0.14	0.28
Q. MUCHUBI	0.19	0.19	0.17	0.16	0.21	0.35	0.48	0.55	0.46	0.15	0.08	0.1	0.26
Q. MANGAS	0.12	0.1	0.09	0.1	0.11	0.18	0.21	0.29	0.24	0.12	0.13	0.1	0.15
Q. GUAYABERO	0.23	0.17	0.16	0.18	0.21	0.36	0.38	0.45	0.39	0.2	0.21	0.15	0.26
Q. SAN FRANCISCO_AIPE	0.23	0.18	0.16	0.18	0.21	0.37	0.38	0.46	0.39	0.2	0.21	0.15	0.26

Fuente: Autor, 2019

Como porcentaje para cada unidad de estudio se considera el promedio de los porcentajes mensuales y este se aplica al caudal estimado en el numeral anterior como oferta hídrica superficial total para así cuantificar el caudal ambiental.

Finalmente, la oferta hídrica superficial disponible para cada unidad de estudio y condición hidrológica se consigna en la siguiente tabla.

**Tabla 4-15. Oferta hídrica superficial total, caudal ambiental y oferta hídrica superficial disponible para año hidrológico normal y seco (m³/s)**

NOMBRE	AÑO HIDROLÓGICO NORMAL			AÑO HIDROLÓGICO SECO		
	OHST	Qa	OHSD	OHST	Qa	OHSD
RIO AIPE	20.823	7.156	13.644	3.83	1.316	2.49
Q. AGUACHE	0.919	0.278	0.642	0.101	0.031	0.071
Q. AIPECITO	1.618	0.498	1.12	0.229	0.071	0.159
Q. JERONIMO	0.672	0.093	0.579	0.038	0.005	0.033
Q. EL TAMBO	0.16	0.043	0.117	0.023	0.006	0.017
Q. EL CONEJO-NEIVA	0.287	0.078	0.21	0.042	0.011	0.03
R. CACHICHI	2.352	0.659	1.693	0.356	0.1	0.256
Q. PIPILICUA	0.386	0.119	0.267	0.057	0.018	0.039
Q. LOS ORGANOS	1.171	0.348	0.822	0.16	0.048	0.113
Q. BUENAVAQUERA	0.446	0.082	0.364	0.034	0.006	0.028
Q. TINAIL	0.191	0.026	0.164	0.011	0.002	0.01
Q. MIEL DE ABEJAS	0.256	0.036	0.221	0.016	0.002	0.013
Q. LA SARDINA-NEIVA	0.265	0.075	0.19	0.041	0.012	0.029
Q. CARBONERA	0.075	0.022	0.054	0.011	0.003	0.008
Q. EL CHOCHO	0.155	0.046	0.109	0.021	0.006	0.015
Q. TAMBILLA	0.447	0.126	0.32	0.055	0.016	0.04
Q. MUCHUBI	0.736	0.19	0.545	0.068	0.018	0.051
Q. MANGAS	2.872	0.429	2.443	0.244	0.036	0.208
Q. GUAYABERO	0.572	0.147	0.425	0.079	0.02	0.059
Q. SAN FRANCISCO_AIPE	1.651	0.427	1.225	0.227	0.059	0.169

Fuente: Autor, 2019

#### 4.5.DEMANDA HÍDRICA

La demanda hídrica considerada en el desarrollo del presente proyecto hace referencia a las concesiones otorgada por la autoridad ambiental competente sobre el cauce del río Aipe y sobre sus afluentes hídricas. Estas junto con los caudales se referencian en la tabla 4-15.

**Tabla 4-16. Demanda hídrica subcuenca hidrográfica del río Aipe**

No.	NOMBRE	DEMANDA (m <sup>3</sup> /s)
1	RIO AIPE	2.483
2	Q. AGUACHE	0.000
3	Q. AIPECITO	0.000
4	Q. JERONIMO	0.000
5	Q. EL TAMBO	0.000
6	Q. EL CONEJO- NEIVA	0.000
7	R. CACHICHI	0.000
8	Q. PIPILICUA	0.000
9	Q. LOS ORGANOS	0.001
10	Q. BUENAVAQUERA	0.000
11	Q. TINAIL	0.000
12	Q. MIEL DE ABEJAS	0.000
13	Q. LA SARDINA- NEIVA	0.000
14	Q. CARBONERA	0.000
15	Q. EL CHOCHO	0.004
16	Q. TAMBILLA	0.000
17	Q. MUCHUBI	0.017
18	Q. MANGAS	0.001
19	Q. GUAYABERO	0.000
20	Q. SAN FRANCISCO_AIPE	0.000

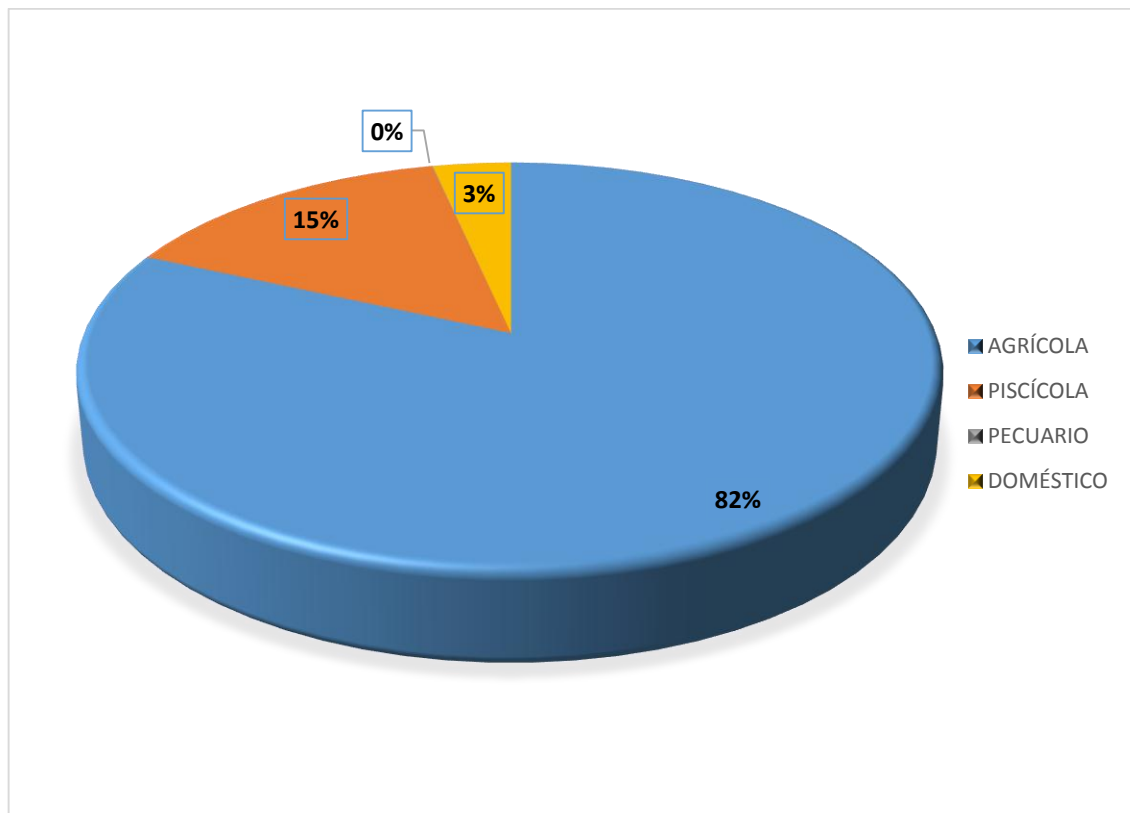
**Fuente:** Autor, 2019

De acuerdo con lo contenido en la tabla anterior se tiene que en 5 de las fuentes hídricas analizadas se tiene derivaciones de caudal que cuentan con permiso de concesión de aguas y que de estas es el río Aipe la fuente con una mayor cantidad de caudal derivado. A continuación, se describen los sectores socioeconómicos beneficiados con las aguas que discurren por el cauce del río Aipe (Tabla 4-16) y en la gráfica se muestra su distribución.

**Tabla 4-17. Sectores socioeconómicos usuarios del recurso hídrico del río Aipe**

SECTOR SOCIOECONÓMICO		CANTIDAD	MODULO DE CONSUMO (L/s)	DEMANDA (L/s)
AGRÍCOLA	Arroz	900	2.1	1890
	Cacao	5	1.5	7.5
	Algodón	26.4	1.6	42.24
	Sorgo	30	1.5	45
	Pastos	30	1.5	45
PISCICULTURA	Espejo de agua	105.18	3.5	368.13
PECUARIO	Vacuno	1140	0.00058	0.66
	Avícola	11000	0.00000	0.025
	Porcícola	110	0.00012	0.013
	Ovinos	395	0.00012	0.046
DOMÉSTICO	No Habitantes	36798	0.00231	84.76
Total				2483.37

**Fuente:** CAM, 2009



**Gráfica 4-10. Distribución de uso del recurso hídrico del río Aipe**

**Fuente:** Autor, 2019

El sector socioeconómico con mayor demanda es el agrícola con un 82% del total del caudal captado del río Aipe, seguido está la piscicultura con 15%, doméstico con 3% y en un bajo porcentaje el consumo pecuario.

#### 4.6. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

Para evaluar la vulnerabilidad del sistema al desabastecimiento hídrico inicialmente es necesario cuantificar los cuantificar el índice del uso del agua (IUA) y el índice de regulación y retención hídrica (IRH).

##### 4.6.1. Índice del uso del agua

Los resultados obtenidos para el índice del uso del agua para condiciones hidrológicas normal y seca se incluyen en las tablas 4-17 y 4-18 y se representan en las figuras 4-22 y 4-23.

**Tabla 4-18. Índice del uso del agua para una condición hidrológica normal**

No.	NOMBRE	OHSD (m3/s)	DEMANDA (m3/s)	IUA	SIGNIFICADO
1	Rio Aipe	13.644	2.483	18.20%	Moderado
2	Q. Aguache	0.642	0.000	0.00%	Muy bajo
3	Q. Aipecito	1.120	0.000	0.00%	Muy bajo
4	Q. Jeronimo	0.579	0.000	0.00%	Muy bajo
5	Q. El Tambo	0.117	0.000	0.00%	Muy bajo
6	Q. El Conejo-Neiva	0.210	0.000	0.00%	Muy bajo
7	R. Cachichi	1.693	0.000	0.00%	Muy bajo
8	Q. Pipilicua	0.267	0.000	0.00%	Muy bajo
9	Q. Los Organos	0.822	0.001	0.15%	Muy bajo
10	Q. Buenavaquera	0.364	0.000	0.00%	Muy bajo
11	Q. Tinaíl	0.164	0.000	0.00%	Muy bajo
12	Q. Miel De Abejas	0.221	0.000	0.00%	Muy bajo
13	Q. La Sardina-Neiva	0.190	0.000	0.00%	Muy bajo
14	Q. Carbonera	0.054	0.000	0.00%	Muy bajo
15	Q. El Chocho	0.109	0.004	3.92%	Bajo
16	Q. Tambilla	0.320	0.000	0.00%	Muy bajo
17	Q. Muchubi	0.545	0.017	3.03%	Bajo
18	Q. Mangas	2.443	0.001	0.05%	Muy bajo



No.	NOMBRE	OHSD (m3/s)	DEMANDA (m3/s)	IUA	SIGNIFICADO
19	Q. Guayabero	0.425	0.000	0.00%	Muy bajo
20	Q. San Francisco_Aipe	1.225	0.000	0.00%	Muy bajo

Fuente: Autor, 2019

**Tabla 4-19. Índice del uso del agua para una condición hidrológica seca**

No.	NOMBRE	OHSD (m3/s)	DEMANDA (m3/s)	IUA	SIGNIFICADO
1	Rio Aipe	2.490	2.483	99.72%	Muy Alto
2	Q. Aguache	0.071	0.000	0.00%	Muy bajo
3	Q. Aipecito	0.159	0.000	0.00%	Muy bajo
4	Q. Jeronimo	0.033	0.000	0.00%	Muy bajo
5	Q. El Tambo	0.017	0.000	0.00%	Muy bajo
6	Q. El Conejo-Neiva	0.030	0.000	0.00%	Muy bajo
7	R. Cachichi	0.256	0.000	0.00%	Muy bajo
8	Q. Pipilicua	0.039	0.000	0.00%	Muy bajo
9	Q. Los Organos	0.113	0.001	1.07%	Bajo
10	Q. Buenavaquera	0.028	0.000	0.00%	Muy bajo
11	Q. Tinail	0.010	0.000	0.00%	Muy bajo
12	Q. Miel De Abejas	0.013	0.000	0.00%	Muy bajo
13	Q. La Sardina-Neiva	0.029	0.000	0.00%	Muy bajo
14	Q. Carbonera	0.008	0.000	0.00%	Muy bajo
15	Q. El Chocho	0.015	0.00427	28.36%	Alto
16	Q. Tambilla	0.040	0.000	0.00%	Muy bajo
17	Q. Muchubi	0.051	0.0165	32.51%	Alto
18	Q. Mangas	0.208	0.00124	0.60%	Muy bajo
19	Q. Guayabero	0.059	0.000	0.00%	Muy bajo
20	Q. San Francisco_Aipe	0.169	0.000	0.00%	Muy bajo

Fuente: Autor, 2019

Para un año de condiciones hidrológicas normales no se identifican presiones fuertes de la demanda hídrica sobre la oferta hídrica superficial disponible; para el río Aipe que es la fuente hídrica más intervenida la categoría para este índice es moderada. Sin embargo, cuando se analiza un año con una condición hidrológica seca, la categoría del IUA para el río Aipe aumenta a muy alto que indica que casi la oferta hídrica superficial disponible es consumida para abastecer las necesidades de sus usuarios y para las quebradas El Chocho y Muchubí la categoría es de Alto que indica que más de un 20% de la oferta es derivada para el abastecimiento de las necesidades hídricas.

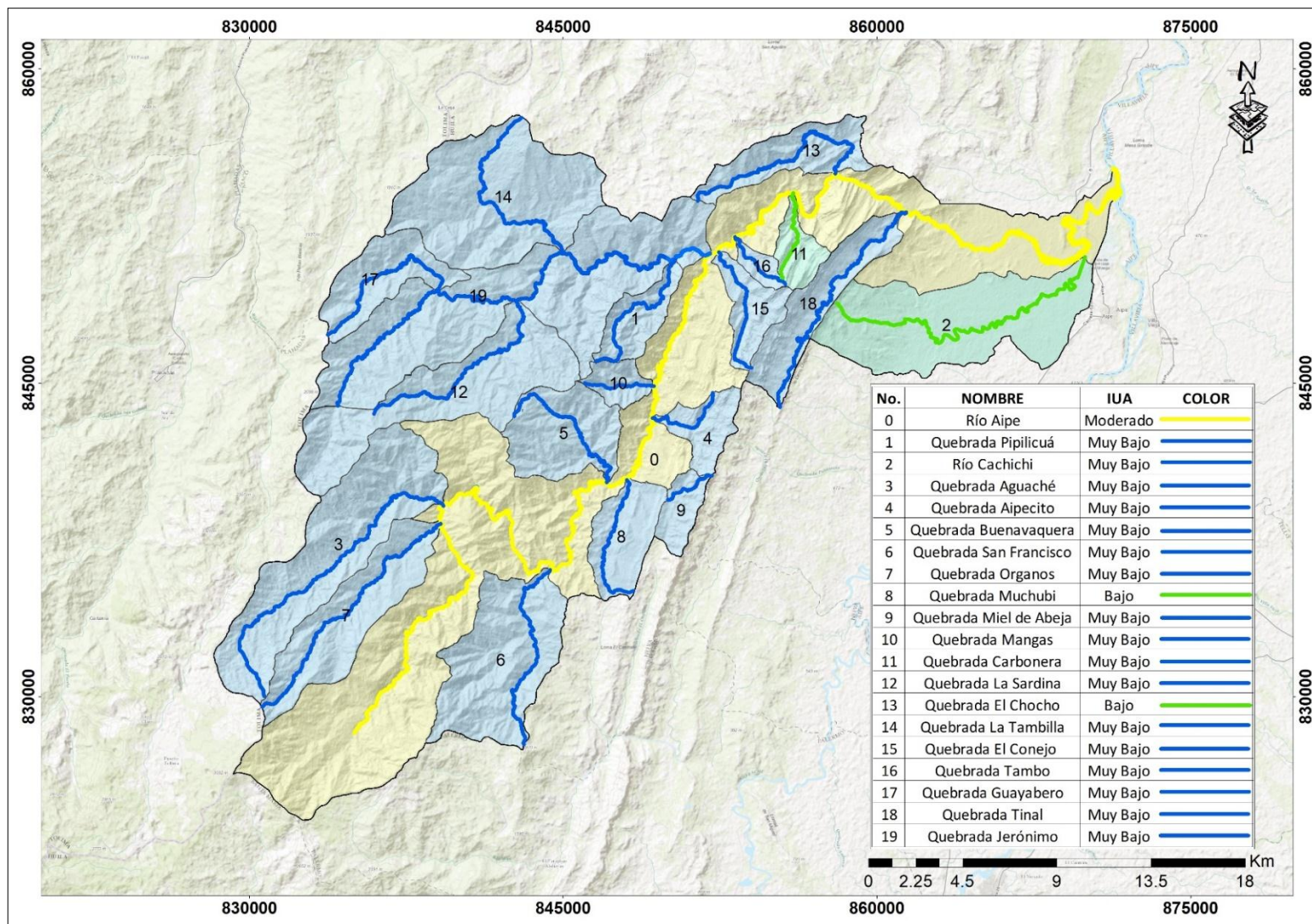


Figura 4-22. Índice del uso del agua para una condición hidrológica normal

Fuente: Autor, 2019



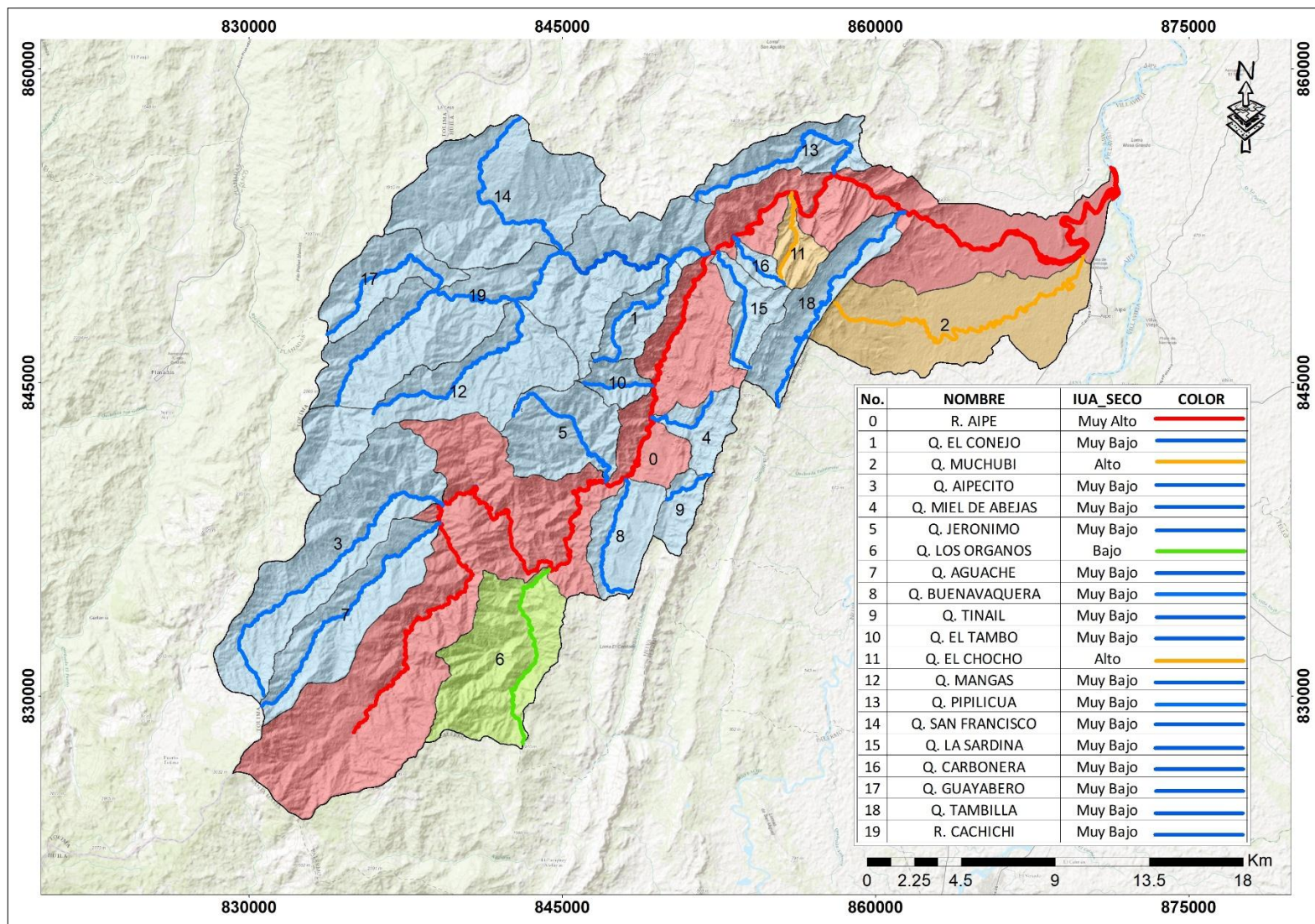


Figura 4-23. Índice del uso del agua para una condición hidrológica seca

Fuente: Autor, 2019

#### 4.6.2. Índice de retención y regulación hídrica (IRH)

Los resultados obtenidos para este índice en cada una de las unidades de estudio se consignan en la 4-20 y su distribución espacial en la figura 4-24.

**Tabla 4-20. Índice de retención y regulación hídrica IRH**

No.	NOMBRE	ÁREA	IRH	CALIFICACIÓN
1	Rio Aipe	663.5	0.67	Moderada
2	Q. Aguache	27.94	0.65	Moderada
3	Q. Aipecito	47.99	0.65	Moderada
4	Q. Jeronimo	20.58	0.56	Baja
5	Q. El Tambo	5.19	0.62	Baja
6	Q. El Conejo-Neiva	9.39	0.62	Baja
7	R. Cachichi	72.36	0.63	Baja
8	Q. Pipilicua	15.53	0.63	Baja
9	Q. Los Organos	35.27	0.62	Baja
10	Q. Buenavaquera	14.02	0.58	Baja
11	Q. Tinail	6.14	0.56	Baja
12	Q. Miel De Abejas	8.53	0.56	Baja
13	Q. La Sardina-Neiva	9.64	0.63	Baja
14	Q. Carbonera	2.84	0.63	Baja
15	Q. El Chocho	6.24	0.61	Baja
16	Q. Tambilla	18.49	0.58	Baja
17	Q. Muchubi	47.39	0.52	Baja
18	Q. Mangas	40.51	0.65	Moderada
19	Q. Guayabero	16.47	0.62	Baja
20	Q. San Francisco_Aipe	48.43	0.62	Baja

**Fuente:** Autor, 2019

De acuerdo con el contenido de la tabla anterior se observa una condición desfavorable en aproximadamente el 50% del territorio de la subcuenca hidrográfica del río Aipe para retener y regular su humedad. En 16 de sus microcuencas el IRH es categorizado como bajo y en 3 este es moderado. Lo anterior supone que ante la influencia de fenómenos en los que predominan la ausencia de precipitación, la subcuenca del río Aipe se verá afectada por la marcada disminución de su recurso hídrico.



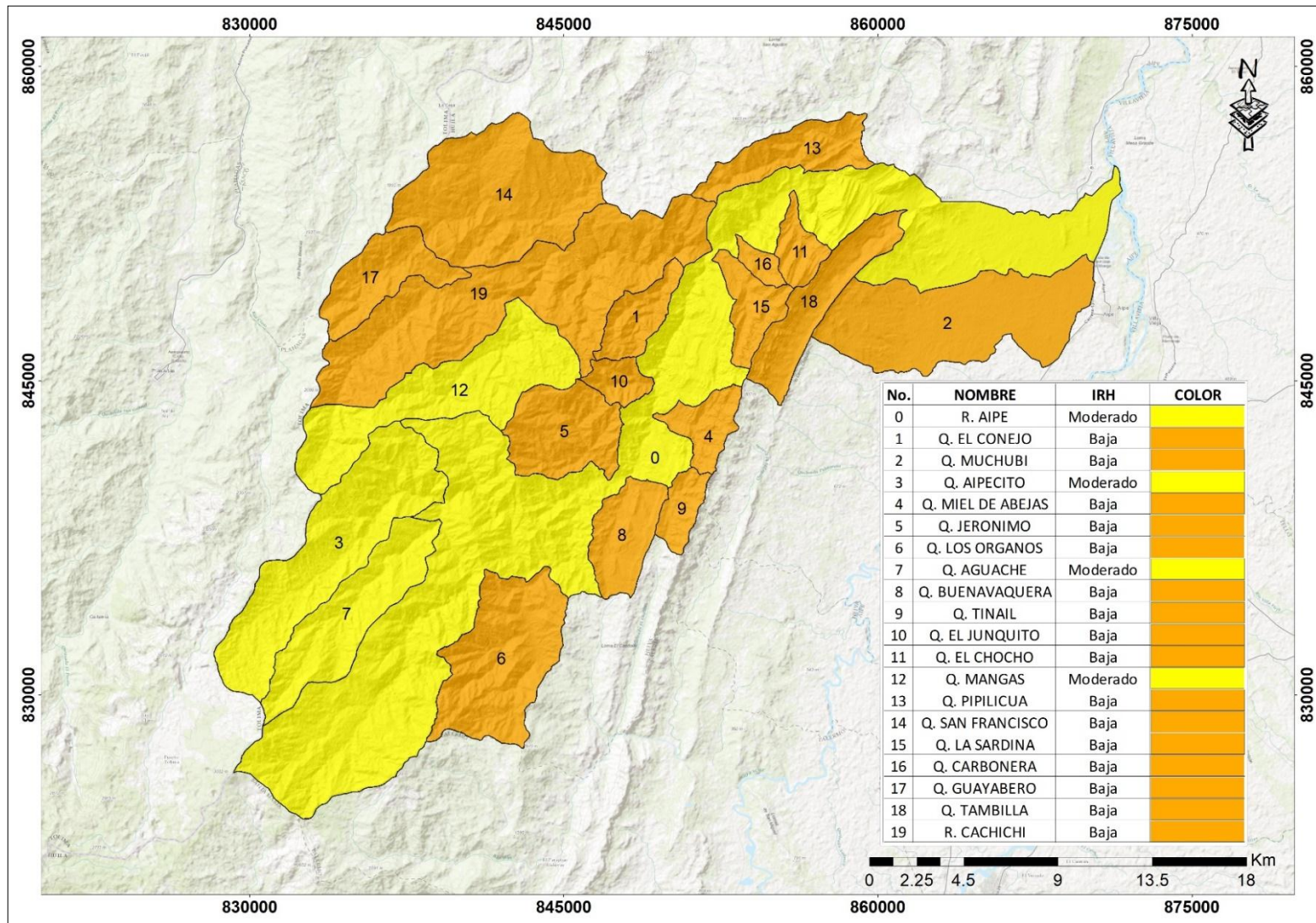


Figura 4-24. Índice del regulación y retención hídrica

Fuente: Autor, 2019

### 4.6.3. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico

Los resultados obtenidos para este índice en condiciones hidrológicas normales y secas se presentan en las tablas 4-21 y 4-22 y se distribuye espacialmente en las figuras 4-25 y 4-26.

**Tabla 4-21. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico para una condición hidrológica normal**

No.	NOMBRE	IUA	SIGNIFICADO	IRH	CALIFICACIÓN	IVH
1	Rio Aipe	18.20%	Moderado	0.67	Moderada	Media
2	Q. Aguache	0.00%	Muy bajo	0.65	Moderada	Baja
3	Q. Aipecito	0.00%	Muy bajo	0.65	Moderada	Baja
4	Q. Jeronimo	0.00%	Muy bajo	0.56	Baja	Media
5	Q. El Tambo	0.00%	Muy bajo	0.62	Baja	Media
6	Q. El Conejo-Neiva	0.00%	Muy bajo	0.62	Baja	Media
7	R. Cachichi	0.00%	Muy bajo	0.63	Baja	Media
8	Q. Pipilicua	0.00%	Muy bajo	0.63	Baja	Media
9	Q. Los Organos	0.15%	Muy bajo	0.62	Baja	Media
10	Q. Buenavaquera	0.00%	Muy bajo	0.58	Baja	Media
11	Q. Tinail	0.00%	Muy bajo	0.56	Baja	Media
12	Q. Miel De Abejas	0.00%	Muy bajo	0.56	Baja	Media
13	Q. La Sardina-Neiva	0.00%	Muy bajo	0.63	Baja	Media
14	Q. Carbonera	0.00%	Muy bajo	0.63	Baja	Media
15	Q. El Chocho	3.92%	Bajo	0.61	Baja	Media
16	Q. Tambilla	0.00%	Muy bajo	0.58	Baja	Media
17	Q. Muchubi	3.03%	Bajo	0.52	Baja	Media
18	Q. Mangas	0.05%	Muy bajo	0.65	Moderada	Baja
19	Q. Guayabero	0.00%	Muy bajo	0.62	Baja	Media
20	Q. San Francisco_Aipe	0.00%	Muy bajo	0.62	Baja	Media

Fuente: Autor, 2019

**Tabla 4-22. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico para una condición hidrológica seca**

No.	NOMBRE	IUA	SIGNIFICADO	IRH	CALIFICACIÓN	IVH
1	Rio Aipe	99.72%	Muy Alto	0.67	Moderada	Alta
2	Q. Aguache	0.00%	Muy bajo	0.65	Moderada	Baja
3	Q. Aipecito	0.00%	Muy bajo	0.65	Moderada	Baja
4	Q. Jeronimo	0.00%	Muy bajo	0.56	Baja	Media
5	Q. El Tambo	0.00%	Muy bajo	0.62	Baja	Media
6	Q. El Conejo-Neiva	0.00%	Muy bajo	0.62	Baja	Media

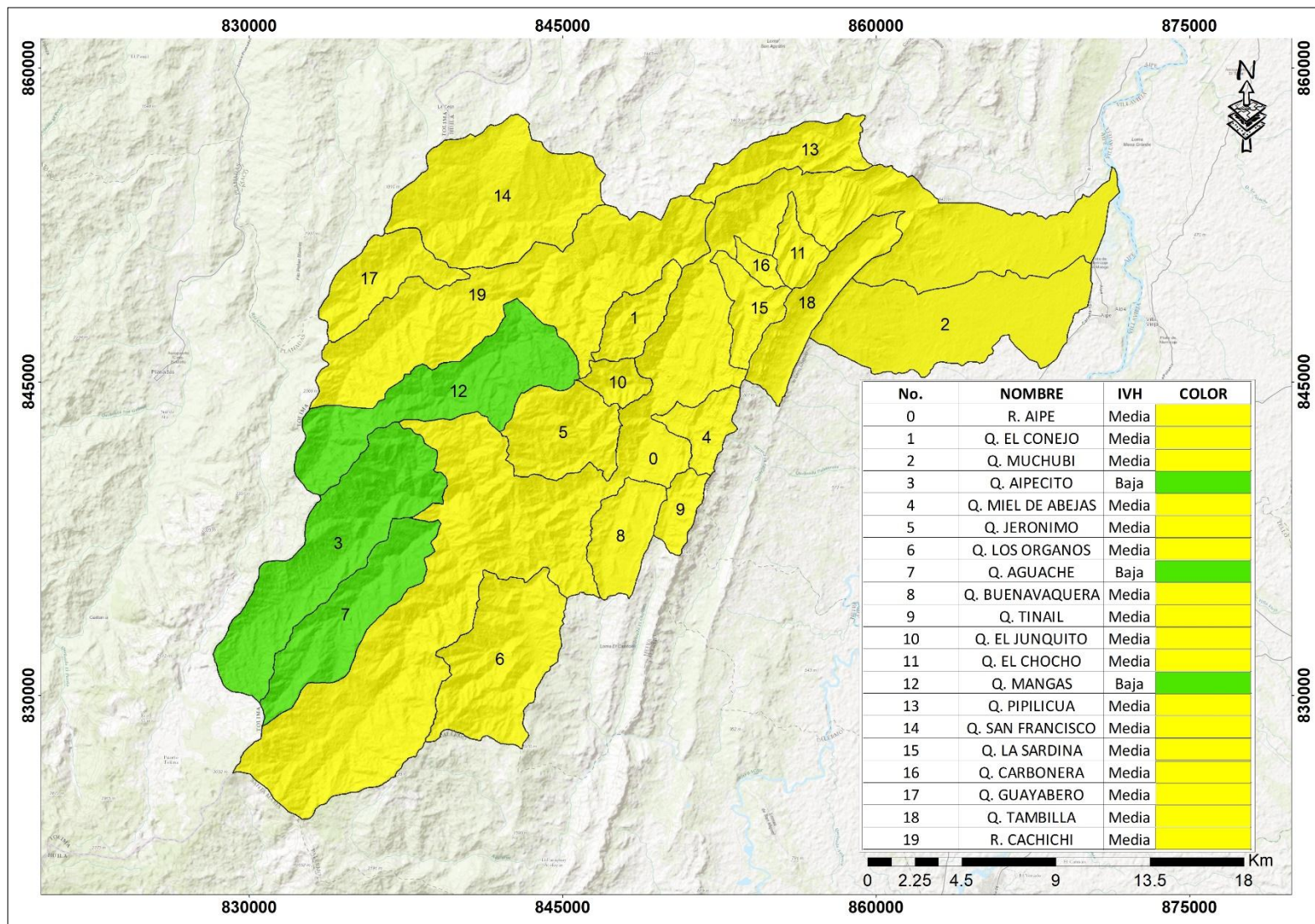
No.	NOMBRE	IUA	SIGNIFICADO	IRH	CALIFICACIÓN	IVH
7	R. Cachichi	0.00%	Muy bajo	0.63	Baja	Media
8	Q. Pipilicua	0.00%	Muy bajo	0.63	Baja	Media
9	Q. Los Organos	1.07%	Bajo	0.62	Baja	Media
10	Q. Buenavaquera	0.00%	Muy bajo	0.58	Baja	Media
11	Q. Tinail	0.00%	Muy bajo	0.56	Baja	Media
12	Q. Miel De Abejas	0.00%	Muy bajo	0.56	Baja	Media
13	Q. La Sardina- Neiva	0.00%	Muy bajo	0.63	Baja	Media
14	Q. Carbonera	0.00%	Muy bajo	0.63	Baja	Media
15	Q. El Chocho	28.36%	Alto	0.61	Baja	Alta
16	Q. Tambilla	0.00%	Muy bajo	0.58	Baja	Media
17	Q. Muchubi	32.51%	Alto	0.52	Baja	Alta
18	Q. Mangas	0.60%	Muy bajo	0.65	Moderada	Baja
19	Q. Guayabero	0.00%	Muy bajo	0.62	Baja	Media
20	Q. San Francisco_Aipe	0.00%	Muy bajo	0.62	Baja	Media

**Fuente:** Autor, 2019

Para una condición hidrológica normal o promedio el grado de fragilidad del sistema hídrico es medio en el río Aipe; por su parte en las quebradas Aguache, Aipecito y Mangas la vulnerabilidad es baja y en los demás afluentes hídricas la vulnerabilidad es media.

Para una condición hidrológica seca la fragilidad del sistema hídrico del río Aipe y de las quebradas el Chocho y Muchubí se categoriza en Alta; en las quebradas Aguache, Aipecito y Mangas la vulnerabilidad se mantiene baja y en las demás fuentes hídricas esta es media.

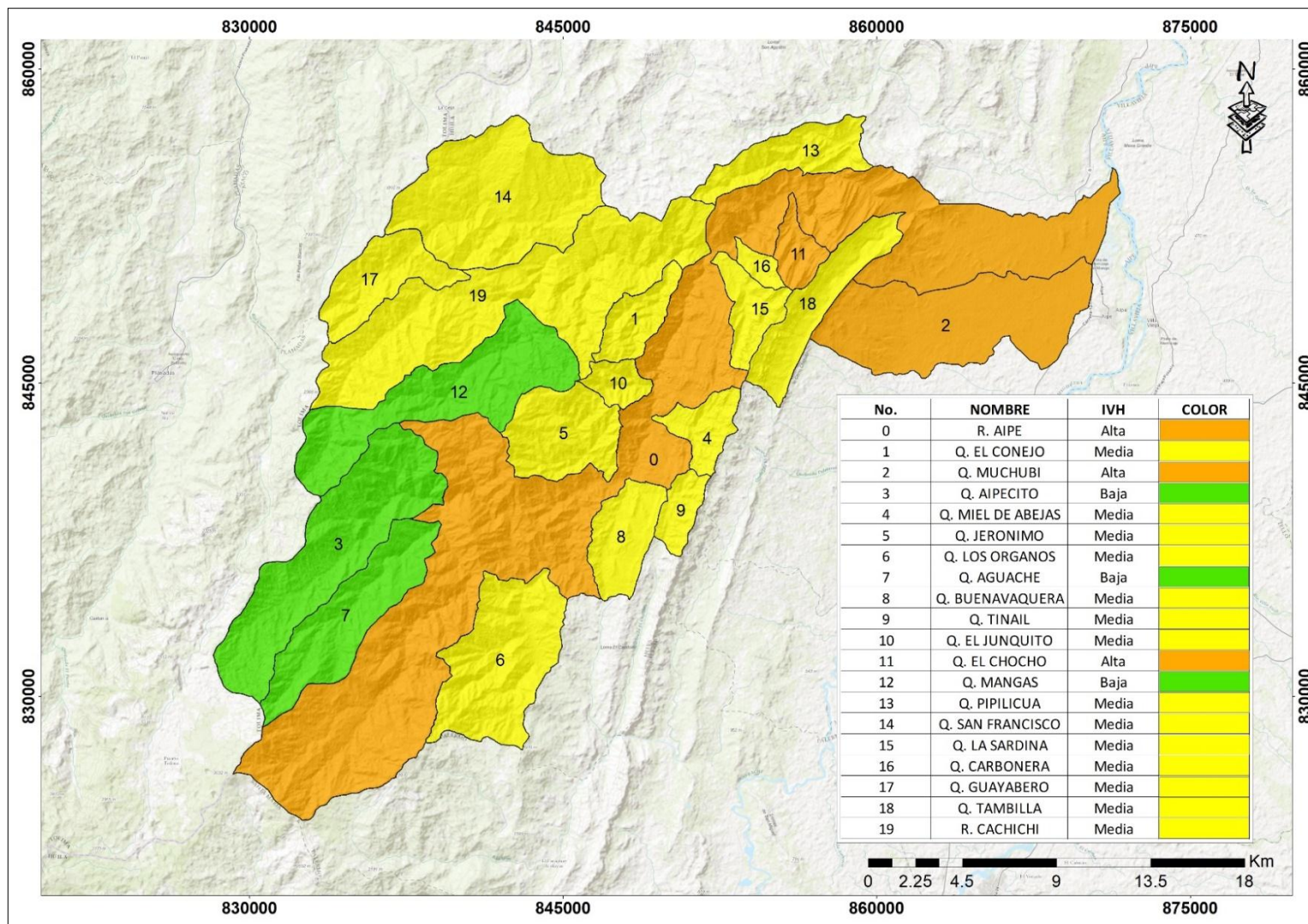




**Figura 4-25. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico para una condición hidrológica normal**

**Fuente:** Autor, 2019





**Figura 4-26. Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico para una condición hidrológica seca**

**Fuente:** Autor, 2019

## **4.7. MEDIDAS DE ADAPTACIÓN O MITIGACIÓN**

Teniendo en cuenta que una medida de adaptación se refiere al ajuste de las diversas actividades al cambio y que la mitigación es la aplicación de aquellas medidas tendientes a la limitación o reducción del uso de los recursos que para el caso específico es el agua, a continuación, se listan algunos de medidas que se deberían adoptar con el fin de no afectar no solo la integralidad del sistema hídrico, sino también los sectores económicos que de él se benefician.

### **4.7.1. Medias de adaptación**

- Educación para el fortalecimiento del uso racional del recurso hídrico y de los recursos conexos.
- Restauración de las coberturas vegetales con el fin de mejorar la retención y regulación de humedad, lo anterior mediante:
  - Adquisición de predios por parte de la autoridad ambiental competente
  - Acotamiento, aislamiento y recuperación de las rondas hídricas.
  - Establecimiento de prácticas de producción sostenibles como los sistemas agrosilvopastoriles.
- Adelantar la formulación de instrumentos de planificación como la formulación del plan de ordenamiento del recurso hídrico de la subcuenca hidrográfica de río Aipe de conformidad con lo establecido en la resolución 751 del 2018 (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2018) con el fin de incorporar al análisis de vulnerabilidad del sistema hídrico otro criterio de importancia como es la calidad del agua.
- Teniendo en cuenta que la resolución que actualmente reglamenta los usos y aprovechamientos del recurso hídrico fue emanada en el año 2009 (CAM, 2009) y, que la

dinámica económica y poblacional, la distribución del territorio y la influencia del cambio climático ha generado modificaciones en los usos del recurso hídrico, se recomienda que este instrumento sea actualizado con base en los resultados obtenidos del diagnóstico del plan de ordenamiento del recurso hídrico.

- La Autoridad ambiental competente y de conformidad con lo establecido en el artículo 2.2.3.2.9.11. del decreto 1076 del 2015 deberá exigir a los usuarios del recurso hídrico la construcción de las obras hidráulicas con el fin de que pueda hacer uso de la concesión y de garantizar que únicamente se extraerá de la fuente hídrica los volúmenes de agua concesionados.
- Requerir y velar por el cumplimiento por parte de los usuarios del recurso hídrico de los programas de uso eficiente y ahorro del agua (PUEA) contemplados en el decreto 1090 del 2018.

#### **4.7.2. Medidas de mitigación**

- Considerando que un gran volumen del agua derivada del río Aipe está destinado a la actividad piscícola y que en este no es un uso consuntivo, puesto que luego de llenados los estanques la única función del agua es la oxigenación, se deberían requerir por parte de la autoridad ambiental competente métodos que permitan el re-uso del agua o de ser posible, métodos de oxigenación alternativos.
- En la eventualidad de presentarse un fenómeno asociado con la disminución extrema de los caudales como lo es el fenómeno ENSO en su fase cálida – El Niño-, la Corporación deberá realizar los ajustes que considere pertinentes y por ende modificar o restringir el uso de los caudales previamente concesionados, lo anterior teniendo la prioridad que se le debe otorgar al acueducto del sector urbano del municipio de Aipe puesto que el río es su única fuente de abastecimiento.

- Descartar los sistemas empleados en la actualidad para el transporte y la aplicación del agua de riego e implementar aquellos con altas eficiencias (conducciones cerradas o revestidas y riegos a presión)

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La subcuenca hidrográfica del río Aipe ocupa un territorio de 663,5 km<sup>2</sup> y posee dentro de su estructura hidrográfica un total de 19 microcuencas hidrográficas. Pertenece al área hidrográfica Magdalena – Cauca y a la Subzona Río Aipe, Río Chenche y otros directos al Magdalena.
- Como producto del análisis de algunas características físicas, de relieve y de forma se tiene que la subcuenca hidrográfica del río Aipe tiene un área de 663,5 km<sup>2</sup> y un perímetro de 158 km. De acuerdo con su pendiente media del 40% se asume que es una cuenca que propicia el fácil escurrimiento de la escorrentía superficial cuando los suelos están saturados y que no es afectada por fenómenos como inundaciones. En relación con su forma, el coeficiente de Gravelius determina que la subcuenca no tiende a concentrar fuertes volúmenes de aguas y el factor de forma define que la subcuenca no está expuesta a la ocurrencia de crecientes torrenciales de gran magnitud y corta duración, más bien, su hidrograma de crecidas tiende a ser achatado.
- La precipitación en la subcuenca hidrográfica del río Aipe presenta un régimen bimodal que obedece al desplazamiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT). Los periodos secos característicos por bajas precipitaciones se presentan para el primer semestre entre diciembre y febrero y para el segundo semestre entre junio y septiembre, siendo en todas las estaciones agosto el mes que presenta un menor valor medio mensual multianual. Por su parte, los periodos húmedos se identifican entre los meses de marzo a mayo y en los meses de octubre y noviembre, siendo noviembre el mes más lluvioso del año. La precipitación media anual multianual de la subcuenca es de 1875.33 mm.
- La temperatura media anual multianual en la subcuenca a aproximadamente 1690 msnm es de 16°C, el valor máximo registrado a esta altura es de 28.6°C. Por otra

parte, a una altura de 500 msnm la temperatura media anual multianual es de 23.1 °C y la máxima es de 42°C. La temperatura media para la subcuenca es de 21.03°C

- El modelo hidrológico SWAT seleccionado para la generación de series sintéticas de caudales en las microcuencas y en la subcuenca hidrográfica del río Aipe presentó un buen ajuste tanto en la calibración como en la validación. En la calibración, la variación interanual de las series de caudales observada y simuladas presentan un ajuste aceptable; el error medio del balance (BE) es de 2,93%, y el coeficiente de eficiencia de Nash para la raíz cuadrada de los caudales (E2) es de 61,72 que se interpreta como satisfactorio. En la validación también hay un buen ajuste entre las series simuladas y observadas; El error medio del balance (BE) es de 5,84%, y el coeficiente de eficiencia de Nash para la raíz cuadrada de los caudales (E2) es de 64,66 que al igual que en la calibración se considera un ajuste satisfactorio.
- La oferta hídrica superficial total del río Aipe para un año hidrológico normal es de 20.82 m<sup>3</sup>/s y para un año hidrológico seco es de 3.83 m<sup>3</sup>/s; el caudal propuesto como ambiental es el 34% de la oferta y la oferta hídrica superficial disponible es de 13.644 m<sup>3</sup>/s para año hidrológico normal y de 2.49 m<sup>3</sup>/s para año hidrológico seco.
- El río Aipe es una fuente hídrica importante para el desarrollo socio económico del municipio de Aipe, de él se derivan aproximadamente 2.5 m<sup>3</sup>/s que son distribuidos así: agricultura 82%, piscicultura 15%, consumo humano un 3% y el caudal restante es utilizado para el consumo de vacunos, aves, puercos y ovinos.
- El índice de uso del agua cuantificado evidencia que para una condición hidrológica normal y siempre y cuando se garantice que los caudales captados sobre las fuentes hídricas son los otorgados por la autoridad ambiental competente no existe una presión fuerte de la demanda hídrica sobre la oferta hídrica. Caso contrario se presenta cuando la oferta analizada es la de un año hidrológico seco; en este caso el índice incrementa de categoría en el río Aipe a muy alto con un valor de 99.72%

que indica que la oferta hídrica superficial disponible es consumida casi en su totalidad para abastecer las necesidades de sus usuarios y en las quebradas El Chocho y Muchubí la categoría es de Alto que indica que más de un 20% de la oferta es derivada para el abastecimiento de las necesidades hídricas de sus usuarios.

- Por otra parte, en aproximadamente el 50% del territorio de la subcuenca hidrográfica del río Aipe existe una condición desfavorable para retener y regular la humedad. En 16 de sus microcuencas el IRH es categorizado como bajo y en 3 este es moderado. Lo anterior supone que ante la influencia de fenómenos en los que predomine la ausencia de precipitación, la subcuenca del río Aipe se verá afectada por la marcada disminución de su recurso hídrico.
- La fragilidad del sistema hídrico es medio en el río Aipe para un año hidrológico normal porque las demandas hídricas son moderadas y la capacidad de regulación de la cuenca también. Por su parte en las quebradas Aguache, Aipecito y Mangas la vulnerabilidad es baja porque no hay demandas hídricas y además la regulación es moderada. En los demás afluentes hídricos la vulnerabilidad es media principalmente por la ineficiencia de sus microcuencas para retener y regular la humedad y no por la utilización del recurso hídrico.
- Para una condición hidrológica seca la fragilidad del sistema hídrico del río Aipe y de las quebradas el Chocho y Muchubí se categoriza en Alta. En el río Aipe esta categoría obedece a que en periodos prolongados de sequía la oferta disponible del río disminuye considerablemente hasta casi llegar a ser igual a los requerimientos hídricos de los usuarios ( $IUA=99.72\%$ ); es decir, la vulnerabilidad en épocas secas se debe a la presión que ejerce la demanda sobre la oferta y a la moderada capacidad de la cuenca para retener y regular su humedad.
- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se plantearon medidas de adaptación y mitigación que deben ser lideradas por la autoridad ambiental competente y en las

que deben integrar a todos los actores involucrados con la subcuenca hidrográfica del río Aipe y con su recurso hídrico.

- Se recomienda al IDEAM o a la CAM la instalación en la subcuenca de estaciones meteorológicas de categoría Climatológica Ordinaria o Climatológica Principal, con el fin de contar con una densidad mayor de estaciones que registren variables climáticas diferentes a la precipitación y que son necesarias para mejorar el ajuste de los modelos hidrológicos a las condiciones locales y además porque contar con información suficiente del clima permite un mayor aprovechamiento de los modelos hidrológicos distribuidos o semidistribuidos.
- Por otra parte, teniendo en cuenta que los resultados para una condición hidrológica normal no evidencian vulnerabilidad del sistema hídrico del río Aipe al desabastecimiento como lo mencionan los usuarios, la autoridad ambiental debe en el menor tiempo posible realizar seguimientos a las concesiones con el fin de verificar que los caudales captados sean los concesionados y que el desabastecimiento no se esté provocando, tal como parece, por un uso ineficiente e irresponsable del agua por parte de los usuarios.



## BIBLIOGRAFÍA

- Bell, F. (1999). *Geological hazards. Their assessment, avoidance and mitigation*. London and New York: E & FN SPON.
- Cabrera, J. (s.f.). *Unidad de Respuesta Hidrológica (H.R.U.)*. Lima, Perú.
- CAM. (2009). *Resolucion No 3408 por la cual se reglamentan los usos y aprovechamientos del río Aipe*. Neiva, Huila.
- CAM. (2016). *Plan general de ordenación forestal*. Neiva.
- Gassman, W. P., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). *The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research direction*.
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua*. Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- IDEAM. (2013). *zonificación hidrográfica nacional*. Santa fé de Bogotá .
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua*. Santa Fé de Bogotá.
- IDEAM. (2017). *Catálogo Nacional de Estaciones*. Santa Fé de Bogotá.
- IGAC. (1999). *Estudio de suelos del Huila*. Bogotá D.C.
- IGAC. (2016). *Cartográfica base. Escala 1:25.000*. Santa Fé de Bogotá.
- INGEOEXPERT. (2018). *Modelación matemática aplicada a la hidrología: Modelo SWAT*. Madrid, España.
- Londoño, C. (2001). *Cuenca hidrográficas, bases conceptuales - caracterización - planificación - administración*. Ibague.
- Ma, L., II, J. C., Ahuja, L. R., Shaffer, M. J., Hanson, J. D., & Rojas., K. W. (2000). *Root zone water quality model sensitivity analysis using Monte Carlo simulation*.
- MINAMBIENTE. (2014). *Guía técnica para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico*. Bogota.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2018). *Resolucion 751*. Bogotá D.C. .
- Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Santa Fé de Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Moriasi. (2007). *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed*.

Santos, J. M. (2015). *Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Santa fé de Bogotá, Colombia.

Torres, E., Fernández, D., Oropeza, J., & Mejía, E. (2004). Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejote" Atlacomulco, estado de México. *Terra latinoamericana*, 437 - 444.

Uribe, N. (2010). *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT 2005*.

## **ANEXOS**

1. Representación de alturas del área de estudio
2. Distribución de cobertura y tipo de suelo
3. Unidades hidrológicas de respuesta
4. Fichero climático
5. Series de caudales simulados